



**Universidade Federal do Paraná – Campus Curitiba**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE

## **UTILIZAÇÃO DA CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

**CURITIBA**  
**Março / 2013**

**RODRIGO CÉZAR KANNING**

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA COMO  
ADIÇÃO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marienne R. M. Maron da Costa

**CURITIBA**

**Março / 2013**

Dedico este trabalho a meu pai Angelo Tortato Kanning

## **AGRADECIMENTOS**

Esta tese foi escrita com o intuito de facilitar, na medida do possível, a tarefa de pesquisador, para que sirva de ajuda a todos aqueles a qual a construção põe em contato com outras áreas de interesse.

Para finalizar este preâmbulo constam aqui os meus agradecimentos a Deus, que me deu saúde e força para concluir esta etapa de trabalho. Ao meu pai Angelo que sempre almejou ter um filho doutor, sendo um dos principais incentivadores do projeto. Não me esquecendo da companhia de cimentos Votorantin, à CAPES, ao CNPq, à COELBA, à ANEEL, dos setores da UFPR como: PIPE; dos laboratórios do LAME; LACTEC; LAMIR; aos professores e outros funcionários que contribuíram ao estudo da presente tese. A comunidade de Pedra Chata/Guaraqueçaba/PR/Brasil, a minha família, meu filho, minha noiva e pela dedicação e competência do orientador Kleber Franke Portella e Co-orientadora Marienne R. M. Maron da Costa, pela amizade e comprometimento com o projeto possibilitando que este fosse desenvolvido nos laboratórios da referida instituição.



*“A arte de ser professor é estar  
em constante aprendizado”  
(Rodrigo Kanning)*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xviii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xx</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3 HIPÓTESE DO TRABALHO.....	3
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 CIMENTO PORTLAND .....	5
2.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	5
2.3 POROSIDADE DA PASTA DE CIMENTO .....	7
2.4 ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE PASTA E AGREGADO.....	8
2.5 POZOLANA .....	10
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS .....	12
2.7 TIPOS DE MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	13
2.8 CLASSIFICAÇÃO QUANDO A ATIVIDADE CIMENTANTE, POZOLÂNICA E FILER .....	14
2.9 REAÇÃO POZOLÂNICA .....	17
2.10 EFEITOS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS POZOLANAS .....	17
2.11 UTILIZAÇÃO DA POZOLANA EM CONCRETOS E ARGAMASSAS ....	18
2.12 CINZAS DE CASCA DE BANANA .....	19
2.13 CONSUMO DE ARGAMASSAS NO BRASIL.....	21
2.14 A ARGAMASSA, OS REVESTIMENTOS E SUAS FUNÇÕES .....	22
2.14.1 Argamassa de revestimento.....	22
2.14.2 Trabalhabilidade, consistência e plasticidade .....	23

2.14.3 Retenção de água .....	24
2.14.4 Massa específica e teor de ar incorporado.....	24
2.14.5 Reologia .....	25
2.14.6 <i>Squeeze-flow</i> .....	28
2.14.7 Difração de raios-X.....	30
2.14.8 Fluorescência de raios-X.....	31
2.14.9 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	32
2.14.10 Resistência mecânica.....	33
2.14.11 Resistência de aderência de argamassas.....	34
2.15 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	34
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>36</b>
3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	38
3.2.1 Agregado miúdo .....	38
3.2.2 Aglomerante .....	38
3.2.3 Água .....	40
3.2.4 Adição .....	40
3.2.5 Aditivo.....	40
3.3 PRODUÇÃO DA CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA.....	40
3.3.1 Determinação da intensidade de cor dos materiais pozolânicos.....	41
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	42
3.4.1 Determinação do resíduo na peneira 45 µm .....	42
3.4.2 Massa específica.....	43
3.4.3 Método de permeabilidade ao ar – método de <i>Blaine</i> .....	43
3.4.4 Difração e fluorescência de raios-X.....	44
3.4.5 Granulometria a laser .....	46
3.4.6 Microscopia eletrônica de varredura das pozolanas.....	47
3.4.7 Índice de atividade pozolânica com a cal .....	47
3.4.8 Ensaio de Chapelle Modificado .....	50
3.5 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS.....	50
3.5.1 Determinação do tamanho da amostra .....	52
3.6 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	53
3.6.1 Ensaio de consistência – <i>Flow Table</i> .....	53

3.6.2 Ensaio de consistência por <i>Squeeze-flow</i> .....	53
3.6.3 Determinação da retenção de água .....	54
3.6.4 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado .....	55
3.7 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	57
3.7.1 Resistência à compressão .....	57
3.7.2 Resistência à tração na flexão .....	58
3.7.3 Massa específica no estado endurecido .....	60
3.7.4 Absorção de água por capilaridade .....	60
3.7.5 Microscopia eletrônica de varredura com microsonda analítica de raios-X .....	62
3.7.6 Resistência de aderência superficial .....	63
3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	66
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO .....	68
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS POZOLANAS .....	70
4.2.1 Determinação da intensidade de cor dos materiais pozolânicos.....	71
4.2.2 Granulometria a laser .....	72
4.2.3 Fluorescência de raios-X.....	74
4.2.4 Difração de raios-X.....	75
4.2.5 Análise morfológica das cinzas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura .....	79
4.2.6 Determinação do resíduo na peneira 45 µm .....	85
4.2.7 Massa específica das pozolanas.....	86
4.2.8 Método de permeabilidade ao ar – método <i>Blaine</i> .....	88
4.2.9 Índice de atividade pozolânica com a cal .....	89
4.2.10 Ensaio de Chapelle Modificado .....	90
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO .....	92
4.3.1 Ensaio de consistência – <i>Flow Table</i> .....	92
4.3.2 Massa específica no estado fresco .....	93
4.3.3 Determinação do teor de ar incorporado .....	95
4.3.4 Teste de <i>Squeeze-flow</i> .....	96
4.3.5 Determinação da retenção de água .....	98

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	101
4.4.1 Resistência à tração na flexão .....	101
4.4.2 Resistência à compressão das argamassas .....	103
4.4.3 Massa específica no estado endurecido .....	109
4.4.4 Absorção de água por capilaridade .....	113
4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura .....	115
4.4.6 Resistência de aderência superficial .....	120
4.4.7 Classificação das argamassas segundo a norma NBR13281/05.....	122
 5 CONCLUSÕES.....	 124
 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	 126
 REFERÊNCIAS .....	 127
APÊNDICES .....	156

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Porosidade da pasta de cimento segundo METHA e MONTEIRO .....	8
Figura 2.2 – Representação das formas de ligação entre partículas inseridas em meio líquido.....	9
Figura 2.3 – Comportamento característico de um fluido pseudoplástico .....	27
Figura 2.4 – Comportamento característico de um fluido dilatante .....	27
Figura 2.5 – Exemplo de fluido de Bingham para duas argamassas .....	28
Figura 2.6 – Curva de tensão X deslocamento típica do ensaio de <i>squeeze-flow</i> .....	29
Figura 3.1 – Etapas de ensaio do Programa Experimental (a).....	37
Figura 3.2 – Etapas de ensaio do Programa Experimental (b).....	38
Figura 3.3 – Aspecto de cores das cinzas utilizadas.....	41
Figura 3.4 – Ensaio de peneiramento via úmida .....	42
Figura 3.5 – Massa específica das pozolanas.....	43
Figura 3.6 – Aparelho digital de permeabilidade ao ar de <i>Blaine</i> .....	44
Figura 3.7 – Quarteador .....	45
Figura 3.8 – Moinho de panela com anéis .....	45
Figura 3.9 – Prensa para preparo da amostra.....	46
Figura 3.10 – Difrátômetro de raios-X .....	46
Figura 3.11 – Consistência da argamassa – <i>Flow Table</i> .....	48
Figura 3.12 – Resistência à compressão das argamassas para IAP .....	49
Figura 3.13 – Arranjo de ensaio de consistência por “ <i>Squeeze-flow</i> ” .....	53
Figura 3.14 – Conjunto funil de Buchner e bomba de vácuo.....	54
Figura 3.15 – Ensaio de resistência à compressão de argamassas .....	56
Figura 3.16 – Teste de resistência à tração das argamassas .....	58
Figura 3.17 – Equipamento de ensaio da absorção de água por capilaridade.....	60
Figura 3.18 – Arranjo de ensaio de arrancamento de argamassas.....	62
Figura 3.19 – Pontos pré-determinados para o ensaio de arrancamento .....	63
Figura 3.20 – Pontos de arrancamento para cada idade .....	64
Figura 3.21 – Arranjo de ensaio de arrancamento de argamassa.....	65
Figura 3.22 – Ruptura no substrato (S) .....	65
Figura 3.23 – Ruptura Substrato/argamassa (S/A) .....	65

Figura 3.24 – Ruptura na argamassa (A) .....	65
Figura 3.25 – Ruptura na colagem da pastilha (P) .....	65
Figura 4.1 – Análise granulométrica da areia .....	68
Figura 4.2 – Representação das cores no cubo gerado pela escala de RGB Cinza de folha de bananeira (a); Cinza volante (b) e Sílica ativa (c) ..	69
Figura 4.3 – Granulometria a laser das pozolanas .....	72
Figura 4.4a – Difração de raios-X das cinza de folha de bananeira .....	76
Figura 4.4b – Difração de raios-X da cinza volante .....	76
Figura 4.4c – Difração de raios-X da cinza da sílica ativa .....	77
Figura 4.4d – Sobreposição dos espectros de difração de raios-X dos materiais pozolânicos .....	77
Figura 4.5 – Micrografia da Sílica Ativa (a) e de um grumo de partículas de Sílica Ativa (b) .....	78
Figura 4.6 – Espectro de EDS correspondente à Sílica Ativa analisada .....	79
Figura 4.7 – Micrografia de uma amostra de cinza volante (a). partículas esféricas, ocas e angulosas (b) .....	80
Figura 4.8 – Espectro de EDS correspondente à Cinza Volante .....	80
Figura 4.9 – Micrografia da cinza de folha de bananeira (a), partículas angulosas (b) .....	81
Figura 4.10 – Espectro de EDS correspondente à cinza de folha de bananeira .....	82
Figura 4.11 – Porcentagem de material retido na peneira 45 $\mu$ m .....	83
Figura 4.12 – Massa específica das pozolanas .....	85
Figura 4.13 – Variação do <i>Blaine</i> para cada tempo de moagem .....	86
Figura 4.14 – Índice de atividade pozolânica com a cal para os diferentes materiais .....	87
Figura 4.15 – Ensaio de Chapelle Modificado para os diferentes materiais .....	89
Figura 4.16 – Massa específica das argamassas no estado fresco .....	92
Figura 4.17 – Teor de ar incorporado .....	93
Figura 4.18 – Deformação das argamassas pelo teste de (squeeze flow) .....	94
Figura 4.19 – Retenção de água das argamassas para diferentes porcentagens de adição .....	96
Figura 4.20 – Resistência à tração das argamassas .....	100
Figura 4.21 – Resistência mecânica à compressão das argamassas .....	101

Figura 4.22 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 5% de adição para as argamassas.....	102
Figura 4.23 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 7,5% de adição para as argamassas.....	103
Figura 4.24 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 10% de adição para as argamassas.....	103
Figura 4.25 – Massa específica das argamassas no estado endurecido .....	107
Figura 4.26 – Valores de absorção de água por efeito capilar por 10 minutos .....	109
Figura 4.27 – Valores de absorção de água por efeito capilar por 90 minutos .....	110
Figura 4.28 – Coeficiente de capilaridade das argamassas.....	110
Figura 4.29 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa de referência aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas .....	112
Figura 4.30 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de CV aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas .....	113
Figura 4.31 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de CB aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas .....	115
Figura 4.32 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de Si aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas .....	117
Figura 4.33 – Rompimento da argamassa no substrato.....	118



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das pozolanas quanto ao diâmetro e área específica.....	15
Tabela 2.2 – Classificação e composição dos materiais pozolânicos, cimentantes e filler .....	16
Tabela 2.3 – Quantidade de Cinza produzida para cada material queimado.....	21
Tabela 3.1 – Quantidade de materiais empregados nas argamassas .....	51
Tabela 4.1 – Classificação do agregado natural .....	67
Tabela 4.2 – Classificação de cores das cinzas pelo método RGB .....	70
Tabela 4.3 – Diâmetro médio das partículas das pozolanas trabalhadas .....	71
Tabela 4.4 – Análise granulométrica das pozolanas .....	71
Tabela 4.5 – Análise química das pozolanas .....	73
Tabela 4.6 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na sílica ativa ....	79
Tabela 4.7 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na cinza volante.....	81
Tabela 4.8 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na cinza de folha de bananeira .....	82
Tabela 4.9 – Quantidade de material retido na peneira 45 µm .....	83
Tabela 4.10 – Massa específica da cinza para os diferentes tempos de moagem .85	
Tabela 4.11 – <i>Blaine</i> das diferentes cinza de folha de bananeira .....	86
Tabela 4.12 – Índice de atividade pozolânica individual com a cal .....	87
Tabela 4.13 – Resultados do Ensaio de Chapelle Modificado .....	89
Tabela 4.14 – Quantidade de material empregado nas argamassas.....	90
Tabela 4.15 – Massa específica das argamassas no estado fresco .....	91
Tabela 4.16 – Teor de ar incorporado das argamassas.....	93
Tabela 4.17 – Retenção de água das argamassas (%) .....	96
Tabela 4.18 – Relação água/aglomerante+adição para as argamassas .....	98
Tabela 4.19 – Valores de retenção de água conforme NBR 13281/05 .....	98
Tabela 4.20 – Resultados de resistência à tração dos corpos de prova prismáticos .....	99
Tabela 4.21 – Valores de resistência à compressão das argamassas.....	100

Tabela 4.22 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à compressão das argamassas com cinza de folha de bananeira e sílica ativa .....	101
Tabela 4.23 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à compressão das argamassas com cinza de folha de bananeira e cinza volante .....	103
Tabela 4.24 – Classificação da resistência à compressão das argamassas segundo a norma NBR13279/05 .....	105
Tabela 4.25 – Valores de densidade de massa no estado endurecido .....	106
Tabela 4.26 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas no estado endurecido .....	107
Tabela 4.27 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de cinza de folha de bananeira.....	108
Tabela 4.28 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de cinza volante.....	108
Tabela 4.29 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de sílica ativa.....	109
Tabela 4.30 – Valores de coeficiente de capilaridade conforme NBR13281/05.....	111
Tabela 4.31 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada.....	112
Tabela 4.32 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada.....	112
Tabela 4.33 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada.....	114
Tabela 4.34 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada.....	114
Tabela 4.35 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada.....	116
Tabela 4.36 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada.....	116
Tabela 4.37 – Análise quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada.....	117
Tabela 4.38 – Resistência média de aderência das argamassas .....	118
Tabela 4.39 – Classificação das argamassas segundo a NBR13281/05 .....	122

Tabela A1 – Análise estatística das areias pelo método Teste-t.....	154
Tabela A2 – Análise da Variância (ANOVA) para o material retido na peneira 45 µm .....	155
Tabela A3 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das cinzas .....	155
Tabela A4 – Massa específica das argamassas .....	156
Tabela A5 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas.....	156
Tabela A6 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à tração das argamassas.....	157
Tabela A7 – Análise da Variância (ANOVA) para retenção de água das argamassas .....	158
Tabela A8 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à tração das argamassas .....	158
Tabela A9 – Análise granulométrica da areia .....	160
Tabela A10 – Teste de retenção de água das argamassas no estado fresco.....	161
Tabela A11 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias.....	162
Tabela A12 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 56 dias.....	162
Tabela A13 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 91 dias.....	163
Tabela A14 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 28 dias.....	164
Tabela A15 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 28 dias.....	164
Tabela A16 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 91 dias.....	165
Tabela A17 – Valores de densidade de massa no estado endurecido.....	166
Tabela A18 – Resistência de aderência da argamassa de referência .....	167
Tabela A19 – Resistência de aderência da argamassa com 5% CB .....	167
Tabela A20 – Resistência de aderência da argamassa com 7,5% CB .....	168
Tabela A21 – Resistência de aderência da argamassa com 10% CB .....	168
Tabela A22 – Resistência de aderência da argamassa com 5% CV .....	169

Tabela A23 – Resistência de aderência da argamassa com 7,5% CV .....	169
Tabela A24 – Resistência de aderência da argamassa com 10% CV .....	170
Tabela A25 – Resistência de aderência da argamassa com 5% Si .....	170
Tabela A26 – Resistência de aderência da argamassa com 7,5% Si .....	171
Tabela A27 – Resistência de aderência da argamassa com 10% Si .....	171

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação do tamanho dos poros.....	8
Quadro 2.2 – Classificação das pozolanas conforme a NBR12653/92 .....	12
Quadro 2.3 – Classificação das pozolanas conforme ASTM 618-95 .....	13
Quadro 2.4 – Exigências químicas para os materiais pozolânicos (NBR 12653/92) .....	18
Quadro 2.5 – Parâmetros físicos conforme estabelecido pela norma NBR 12563/92 .....	18
Quadro 2.6 – Espessura mínima e máxima do revestimento (NBR 13749/96) .....	23
Quadro 3.1 – Características físicas, químicas e mecânicas do Cimento CII – F32.....	39
Quadro 3.2 – Requisitos químicos e físicos do hidróxido de cálcio NBR5751/92.....	47
Quadro 3.3 – Valores de retenção de água conforme NBR 13281/05 .....	54
Quadro 3.4 – Massa específica das argamassas no estado fresco conforme NBR13281/05.....	55
Quadro 3.5 – Resistência à compressão de argamassas, conforme NBR13281/05.....	57
Quadro 3.6 – Resistência à tração na flexão, conforme NBR13281/05 .....	58
Quadro 3.7 – Massa específica no estado endurecido, conforme NBR13281/05 ..	59
Quadro 3.8 – Coeficiente de capilaridade conforme a norma NBR 15259/05.....	61

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abs	Absorção de água
A	Altura (cm)
c	Comprimento (cm)
IAP	Índice de atividade pozolânica
NBR	Normas Brasileiras
CPII - F 32	Cimento Portland Composto com adição de Filler Calcário e resistência mecânica de 32 MPa aos 28 dias
CPIV	Cimento Portland Pozolânico
CPV ARI-RS	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – Resistente à Sulfatos
CPII – Z	Cimento Portland Composto com adição de pozolana
CSH	Silicato Hidratado de Cálcio
d	Diâmetro
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
h	Altura
LAME	Laboratório de Materiais e Estruturas
LAMIR	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
Ibidem	Termo usado em citações para indicar <i>o mesmo autor, da mesma forma</i> , e isso com o intuito de evitar repetições.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFPR	Universidade Federal do Paraná
5%CB	5% de cinza de folha de bananeira
7,5%CB	7,5% de cinza de folha de bananeira
10%CB	10% de cinza de folha de bananeira
5%CV	5% de cinza volante
7,5%CV	7,5% de cinza volante
10%CV	10% de cinza volante
5%Si	5% de sílica ativa
7,5%Si	7,5% de sílica ativa
10%Si	10% de sílica ativa

Kanning, Rodrigo Cézar. Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland, 2013, Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 192 p.

## RESUMO

Na presente tese foi investigada a influência da adição de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa em uma argamassa de cimento Portland no traço 1:3 em massa considerada referência. Foram estudadas adições deste material nas proporções de 5%, 7,5% e 10% em relação à massa de cimento empregado na argamassa de referência. A metodologia foi centrada na caracterização dos materiais utilizados por meio de técnicas físicas e químicas, incluindo a granulometria por difração de raios laser e por fluorescência de raios-X. O comportamento das argamassas no estado fresco foi avaliado por meio da consistência com o método “*flow table, squeeze flow*”, ar incorporado, retenção de água e massa específica. No estado endurecido o material foi caracterizado por técnicas de resistência à tração na flexão, resistência mecânica à compressão, absorção de água por capilaridade, massa específica no estado endurecido, microscopia eletrônica de varredura e arrancamento de argamassa em paredes. Com os resultados dos ensaios pode-se concluir que a cinza da folha de bananeira quando adicionada em argamassas de cimento Portland apresenta resistências mecânicas superiores à argamassa de referência e com adição de cinza volante e semelhantes a argamassa com adição de sílica ativa.

Palavras-chave: cinza de folha de bananeira; cinza volante; sílica ativa, argamassa.

Kanning, Rodrigo Cézar. Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland, 2013, Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 192 p.

## **ABSTRACT**

In this thesis was investigated the influence of the addition of banana leaf ash, fly ash and silica fume in a cement mortar in 1:3 ratio mass considered reference. Additions of this material were evaluated in proportions of 5%, 7.5% and 10% relative to the mass of cement mortar employed in the reference. The methodology was centered in the characterization of materials by means of physical and chemical techniques, including particle size analyzer and chemical composition by fluorescent X-rays analysis. The behavior of fresh mortars was evaluated by flow table, squeeze flow, entrained air, water retention and bulk density. Hardened material was characterized by techniques of tensile strength in bending, mechanical strength, water absorption by capillarity density, scanning electron microscopy and tearing of the mortar in walls. With the results of the tests can be concluded that the ash of banana leaf when added to Portland cement mortars has mechanical strength higher than the reference mortar and with addition of fly ash mortar and similar to silica fume.

**Keywords:** banana leaf ash; fly ash; silica fume; mortar.



## 1 INTRODUÇÃO

O emprego de materiais alternativos na construção civil tem sido cada vez mais intenso. MARGON e ROCHA (2003), RESS (1999) e SILVA & SOUZA (1995) descreveram que o referido emprego está assegurado pelo grande volume de materiais consumidos, bem como pela valorização do uso destes no setor da construção civil e na área de proteção ambiental.

Para JOHN (2000) a cadeia produtiva da construção civil é a maior recicladora da economia, haja vista que possui grande potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, em consideração à quantidade e às características dos resíduos que consome.

Segundo CINCOTTO (1998) o emprego de resíduos oriundos de atividades agrícolas na obtenção de novos materiais e componentes para a construção civil deve-se a necessidade de redução do consumo dos insumos não renováveis, bem como de custos na construção civil. Tal emprego atende aos quesitos de sustentabilidade, economia e ecologia.

Dentre os diversos tipos de resíduos que a construção civil pode empregar destacam-se os materiais pozolânicos, que se caracterizam por possuírem atividade reativa quando em contato com os compostos do cimento.

A utilização de materiais pozolânicos combinados com cimento e a cal para obtenção de argamassas e concretos duráveis e econômicos fazem parte das novas tecnologias, a fim de assegurar a melhoria nas suas características em estado fresco e endurecido.

A intensificação da aplicação e o uso de adições minerais e resíduos em argamassas e concretos vem sendo largamente estudadas nas últimas décadas, a fim de promover a melhoria dos aspectos econômicos, mecânicos e de durabilidade dos compósitos (LEVY, 2007; SAVASTANO JUNIOR, 2008; ROCHA, 2008; NETO, 2006; MANNAN & GANAPATHY, 2004, GONÇALVES, 2001 e YAMAMOTO *et al.*, 1997). Dentre elas destacam-se as cinzas volantes como a cinza de casca de arroz e a argila calcinada (NEVILLE, 1997; OLAWUYI e OLUSOLA, 2010). Apesar de serem menos reativas, as partículas de pozolanas como descreve MORAES (2001) desencadeiam o aparecimento de diversos locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais densa bem como diminuindo o diâmetro e a concentração dos poros.

Aliado a isso, a construção civil possui um grande potencial de utilização de resíduos provenientes de outros processos industriais. A utilização de materiais alternativos favorece não somente a destinação correta dos mesmos, bem como propicia soluções tecnicamente viáveis quando tecnicamente analisados (COIMBRA *et al.*, 2002 e DAL MOLIN, 2005). O emprego destes materiais visa obter qualidade, propriedades e características satisfatórias para serem empregados e, ainda, buscar novas fontes de matéria prima (MARGON e ROCHA a e b, 2003).

A possibilidade de se desenvolver um novo material, agregando melhorias nos aspectos técnicos, propicia um novo foco para a produção de argamassas e concretos compostos com matéria prima reaproveitada. Neste contexto é que se expõe a necessidade de utilização da cinza de folha de bananeira como adição na produção de argamassas, haja vista que é um dos materiais mais consumidos no mundo exceto o concreto.

Contudo, o aumento na utilização destes resíduos favorece o estudo de suas aplicações, sendo uma necessidade que contribui não só para o surgimento de uma nova tecnologia, mas, também, um material voltado a sustentabilidade.

## 1.1 OBJETIVO

Estudar a influência da adição de cinza de folha de bananeira em argamassas de cimento Portland comparadas com uma argamassa de referência e com outras duas adições de cinza volante e sílica ativa.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o comportamento de argamassas de cimento Portland com as adições de 5%; 7,5% e 10% de cinzas de casca de banana em relação à massa do cimento, comparativamente com adições de sílica ativa, cinza volante e uma argamassa de referência, em função da idade aos 28, 56 e 91 dias, de acordo com os requisitos da norma NBR 13281/05.

### 1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A incorporação de materiais com atividade pozolânica em argamassas e concretos se destaca tanto nas literaturas nacionais como nas internacionais. A referida adição gera benefícios tecnológicos; econômicos e ecológicos. Tecnologicamente aumentam a durabilidade dos concretos e argamassas. Economicamente porque possibilitam reduzir a quantidade de energia elétrica e matéria prima utilizada na produção de alguns tipos de cimento Portland, como é o caso dos cimentos de classe CP II, CP III, CP IV e CP V. E ecológicos, pois a maioria das pozolanas são oriundas de processos industriais os quais possuem componentes poluentes podendo ocasionar danos ao meio ambiente e ao ser humano, quando depositados inadequadamente (JUAREZ *apud* ISAIA; GASTALDINI, 2004; JOZIC e ZELIC, 2006; MALHOTRA e METHA, 1996 e COIMBRA *et al.*, 2002). Desta forma verifica-se que muitos estudos abordam a adição de materiais como a cinza volante e a sílica ativa junto ao cimento Portland, concretos e argamassas. No entanto o estudado sobre a cinza de folha de bananeira como adição em argamassas se dá de forma pioneira por este estudo não possuindo referências técnicas sobre o tema.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para o desenvolvimento do projeto de tese foi adotada a premissa de se manter as condições de realização dos ensaios no estado fresco e endurecido em laboratórios climatizados, visando atender aos requisitos de controle de qualidade.

A sequência deste trabalho apresenta-se subdividido em capítulos.

No segundo capítulo está apresentada a Revisão Bibliográfica sobre temas como: pozolana, suas classificações, propriedades físicas e químicas das pozolanas e cinza de folha de bananeira.

O Procedimento Experimental está apresentado no terceiro capítulo, com as variáveis de estudo, os ensaios normalizados e os procedimentos adotados para a avaliação das unidades de estudo.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados e as análises do Procedimento Experimental.

No quinto capítulo estão descritas as condições finais do trabalho, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.5 PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO ESTUDO

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; COSTA, M. R. M. M. da; PUPPI, R. F. K. **Evaluation of Pozzolanic Activity of Banana Leaf Ash.** XII DBMC – International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto – Portugal. April 12th-15th, 2011.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; PUPPI, R. F.; BONATO, M. M.; PORTELLA, M. D. G.; PEREIRA, P. A. M.; SILVA, J. M. da; MEDEIROS, B. L.; CERQUEIRA, D. P.; CABUSSÚ, M. S.; SANTOS, J. C. M. dos.; RODRIGUES, L. E. **Cinza de Folhas de Bananeiras como Material Pozolânico.** INPI. Depósito de Patente ou de Certificado de Adição. Curitiba, 10 de julho de 2012. BR1020120169215. Publicação do Pedido de Patente ou de Certificado de Adição de Invenção.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

Descoberto por Joseph Aspdin em 1824, o cimento Portland foi patenteado numa referência à semelhança entre o clínquer e a Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra (SCANDIUZZI, 1986). O referido nome é uma denominação internacional aplicada para o material aglomerante mais utilizado nas construções (ABCP, 2002).

O protótipo do cimento moderno foi criado em 1845 por Isaac Johnson, que queimou uma mistura de argila e greda (giz) até a formação do clínquer, possibilitando a ocorrência das reações químicas necessárias à formação dos compostos de alta resistência no cimento (NEVILLE, 1997).

A ASTM C150 (*American Society for Testing and Materials*) define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sintetizado, produzidos quando uma mistura de matérias-primas (calcário, argila, filito, minério de ferro) de composição pré determinada são aquecidos a temperaturas médias de 1450 °C.

Desta forma o cimento Portland é constituído, basicamente, por compostos de cálcio, argila e sílica com diâmetros na ordem de 30 a 100 µm, que apresentem os óxidos de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em sua composição. Após a moagem do clínquer adicionam-se quantidades na ordem de 5% de sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) em forma de gipsita (gesso) para inibir as reações instantâneas do clínquer (PIETRUCCI, 1998, AITCIN, 2000 e GOBBO, 2003).

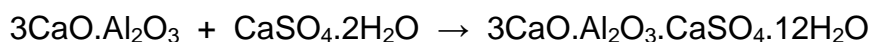
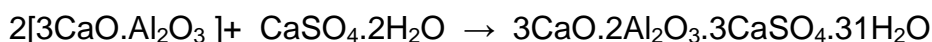
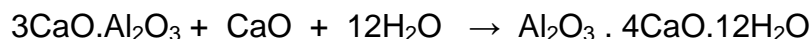
### 2.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Dentre os compostos gerados no processo de clinquerização destaca-se a alita, C<sub>3</sub>S (silicato tricálcico – 3CaO.SiO<sub>2</sub>), responsável pela resistência mecânica até os 28 dias de idade. Em contato com a água forma uma pasta pouco plástica, que é melhorada com a adição de gipsita, também influenciando na pega e na resistência aos três dias de idade. Este material se hidrata rapidamente, gerando calor de hidratação (MEHTA, 1994 e BAUER, 1994). Também, há a belita, C<sub>2</sub>S (silicato

dicálcico –  $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) sendo estável e responsável pela resistência após os 28 dias, hidratando-se lentamente (MEHTA, 1994 e BAUER, 1994).

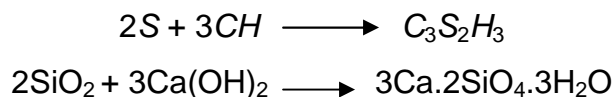
Os aluminatos de cálcio: O  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico –  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) apresenta-se instável em suas fases hidratadas; a pega é rápida com grande despreendimento de calor. A alta reatividade do  $\text{C}_3\text{A}$  quando em contato com a água é controlada com a utilização da gipsita, que controla a tendência de pega (endurecimento) instantânea do clínquer. Também, contribui para a sua resistência nos primeiros dias, que reduz com o tempo (CARVALHO, 2002; MEHTA, 1994; ALVES, 1980 e BAUER, 1994); o  $\text{C}_4\text{AF}$  (ferroaluminato de cálcio –  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) possui pega rápida, porém não instantânea. Tem baixa resistência e o óxido de ferro, age como fundente e fixa a alumina que melhora a resistência ao ataque das águas sulfatadas (CARVALHO, 2002; MEHTA, 1994; ALVES, 1980 e BAUER, 1994).

O mecanismo de hidratação do cimento consiste no enrijecimento da pasta (mistura de cimento e água) por hidrólise, inicialmente, pelos aluminatos seguidos da evolução da resistência pelos silicatos (KAEFER, 2008), como segue apresentado nas reações químicas.



A formação das agulhas de etringita de primeira fase é iniciada logo após o contato da água com o cimento, sendo conhecido como a fase de início da hidratação desenvolvendo a resistência inicial (FARIA, 2004 e CARVALHO, 2002).

A hidratação dos silicatos é iniciada após algumas horas de reação química do cimento, resultando em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos, como segue (JOHN *et al.*, 2003 e RAO, 2003):



O hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), é responsável por preencher os espaços ocupados pela água, devido à sua baixa superfície específica, e pela passivação das armaduras (elementos de aço responsáveis pela resistência à tração). Os cristais de  $Ca(OH)_2$  representam 20% a 25% do volume de sólidos pela pasta, sendo extremamente instáveis quimicamente e podem ser desmanchados pelas partículas de água presentes no ar (PETRUCCI, 1998). A geometria dos cristais de C-S-H são pequenas e fibrilares ao passo que no  $Ca(OH)_2$  são do tipo prismáticas (DAL MOLIN, 1995).

### 2.3 POROSIDADE DA PASTA DE CIMENTO

A resistência mecânica da pasta de cimento está diretamente associada à quantidade e à distribuição de tamanho dos poros existentes (KHATIB, 1996). Tal porosidade relaciona-se com os vazios entre as camadas de C-S-H (CARVALHO, 2002), podendo estes apresentar largura que podem variar de:

- 5 a 25 Å, não influenciando na resistência da pasta;
- > 50 nm, caracterizados como vazios capilares gerados pelo não preenchimento dos espaços vazios pelos componentes do cimento, sendo prejudiciais à resistência mecânica da pasta, pois aumentam a permeabilidade do material sólido à passagem de líquidos e gases pelos poros conectados (ISMAIL, 2006).
- microns ( $\mu m$ ) até centímetros (cm), contendo ar, normalmente com forma esférica, resultantes da deficiência no processo de vibração.

A porosidade da pasta de cimento observada na Figura 2.1 caracteriza este material, pois suas dimensões exercem influências nas propriedades no estado fresco, como a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão iônica, a quantidade de ar incorporado, a retração; e, no estado endurecido, como a resistência mecânica, módulo de deformação e durabilidade (HELENE, 1993; METHA e MONTEIRO, 1994 e RATTANASAK *et al.*, 2005).

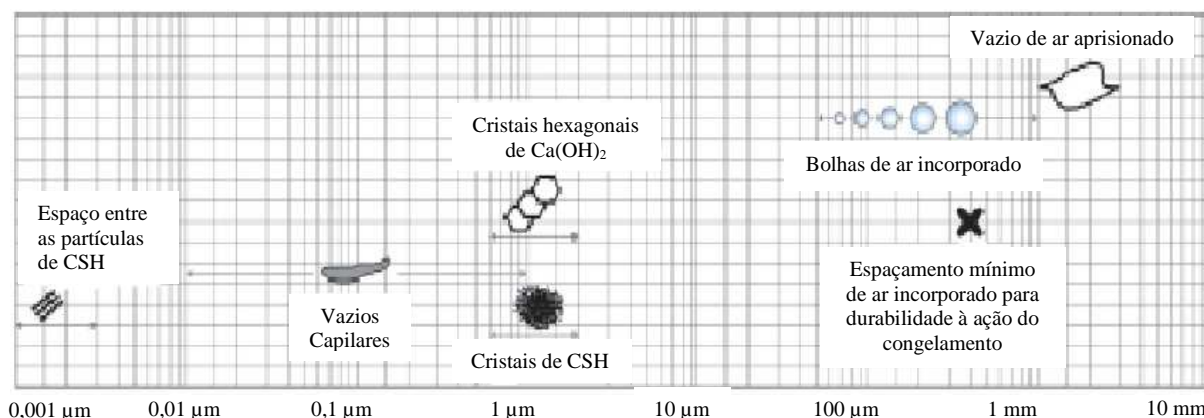


Figura 2.1 – Porosidade da pasta de cimento segundo METHA e MONTEIRO (2008)

O tamanho dos poros para as pastas endurecidas pode ser classificado como descrito pelos autores CAMPITELI (1987) e IUPAC citado por SILVA (2011), e mostrado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Classificação do tamanho dos poros (CAMPITELI, 1987 e IUPAC citado por SILVA, 2011)

Designação	Descrição	Diâmetro
Poros Capilares	Capilares grandes/macro poros	10 μm a 50 nm
	Capilares médios/mesoporos	50 nm a 10 nm
	Capilares pequenos	10 nm a 2,5 nm
Poros do Gel	Microporos	2,5 nm a 0,5 nm
	Microporos “interlamelares”	0,5 nm

## 2.4 ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE A PASTA E O AGREGADO

A zona de transição é caracterizada pelo contato entre a pasta de cimento e os agregados, com dimensões na ordem de 50 μm. A mistura da água com os demais componentes de um concreto ou argamassa propiciam a formação de uma película de água na superfície dos agregados, o que aumenta a porosidade e a heterogeneidade da zona de transição em relação à pasta. Esta torna-se o ponto mais fraco dos compósitos nos primeiros dias de idade, diminuindo as forças de adesão entre pasta/agregado (NEVILLE a e b, 1997; MONTEIRO, 1985).

Para os concretos convencionais e argamassas, as forças mecânicas nas primeiras idades, geram microfissuras que tendem a se propagar pela zona de



transição pasta/agregado, considerada como resistência limite do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994). A película de água ao redor dos agregados nas primeiras idades propicia uma zona de interface pasta/agregado comprometida, na qual se propagam as microfissuras. Tal fator é reduzido com a hidratação do cimento formando novos compostos como o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que aderem à superfície dos agregados (miúdo e graúdos). A ocorrência das fissuras passa a ser no  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  depositado sobre o agregado, criando assim o elo mais fraco do compósito. Porém, espaços vazios (na ordem de microns) gerados pelo alto consumo de água possibilitam a formação de cristais paralelos entre si e perpendiculares ao agregado, facilitando, desta forma, o rompimento dos mesmos e a propagação das fissuras.

As ligações químicas iniciais existentes na pasta de cimento dos concretos e argamassas são do tipo *Van der Waals* (MORAES, 2001). Iniciam-se quando as partículas de água entram em contato com o aglomerante, e após sua distribuição no sistema água/materiais secos passam a criar forças capilares de atração entre as partículas, impedindo o seu afastamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000 e NOKHODCHI, 2005).

A quantidade de água passa a ser um fator crítico para as argamassas, pois quando as partículas ainda encontram-se secas, dispersam-se facilmente devido à inexistência de forças de ligação. Quando mal dosada, a espessura da película de água ao redor das partículas aumenta, passando a afastar os seus constituintes, reduzindo assim as ligações tanto de *Van der Waals* como do tipo forças capilares, como observado na Figura 2.2 (PILEGGI, 2001).

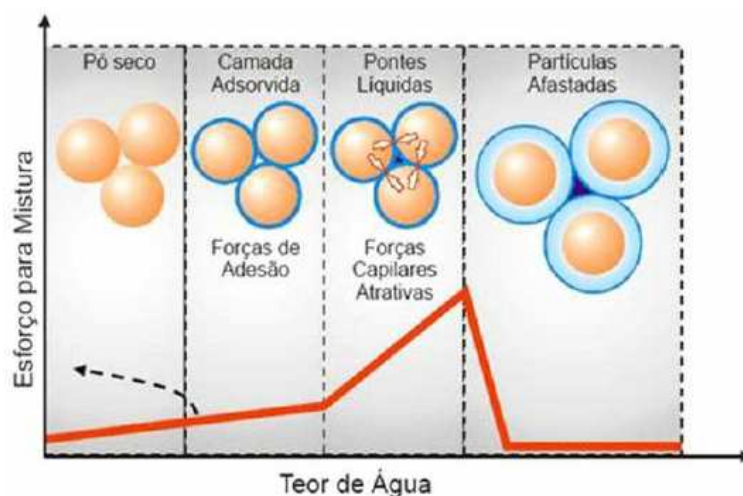


Figura 2.2 – Representação das formas de ligação entre partículas inseridas em meio líquido (PILEGGI, 2001)

As ligações do tipo *Van der Waals* nos concretos e argamassas favorecem as propriedades de resistência ao cisalhamento, porém reduzem a resistência à tração, o que caracteriza uma ruptura com pouca deformação, apresentando-se na forma de falhas, fissuras, vazios, deficiência no contorno dos grãos ou cantos vivos dos agregados, onde se concentram as tensões e seu posterior rompimento (MORAES, 2001).

## 2.5 POZOLANA

A palavra pozolana, originou-se do italiano *pozzolana* ou *pozzuolana*, nome derivado Pozzuole, uma cidade da província de Nápoli-Itália (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Situada em uma região montanhosa, Pozzuole em 24 de agosto de 79 d.C. foi atingida pela erupção do monte Vesúvio, que lançou milhões de toneladas de cinzas sobre as redondezas alcançando camadas de dez à quinze metros de altura.

As primeiras utilizações das pozolanas foram registradas na época do Império Romano, quando se descobriu que as cinzas lançadas pelo monte Vesúvio após misturadas com a cal e água produziam um material rígido e duradouro (SOUZA, 2003). Tal descoberta propiciou a exploração de outras áreas classificadas como zonas vulcânicas do Lácio e da Campânia, seguido então pela bacia mediterrânea. Notava-se, já nessa época, que os diversos vulcões após suas erupções geravam materiais com diversas colorações de material que, conforme descreveu Vitruvius ainda no século I a.C., eram negras; brancas; cinzentas e vermelhas.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), a construção civil, apesar de produzir grandes impactos ambientais, apresenta um grande potencial para consumo de resíduos das outras indústrias. Há vários tipos de resíduos industriais que já são reaproveitados ou reciclados, porém, sua aplicação, ainda é restrita (QUEBAUD *et al.*, 1997). Hoje, tem-se, como exemplo, o aproveitamento de resíduos de escória de alto-forno como adição em materiais cerâmicos e no cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 1994, FRIAS *et al.*, 2007); a sílica ativa e o metacaulim em concretos de alta resistência (AİTCIN, 2000, SHVARZMAN *et al.*, 2003, OLIVEIRA *et al.*, 2004 e ANJOS *et al.*, 2004); e, a cinza de casca de arroz (WEBER, 2001, PRUDÊNCIO JUNIOR *et al.*, 2003 e SANTOS, 2006), cinza de bagaço de cana de açúcar (CORDEIRO *et al.*, 2009 e FERNÁNDEZ *et al.*, 2007); cinza de casca da castanha de caju (LIMA *et al.*, 2008), cinza de lodo de esgoto

urbano (GEYER *et al.*, 2000) como material pozolânico em concretos e argamassas; e a de folhas e caules de bananeira (KANNING, 2010).

A aplicação de adições na construção civil como descrito por SOUZA (2003) foi mais difundida pelo império romano no ano de 79 d.C. quando as cinzas vulcânicas oriundas do monte Vesúvio foram utilizadas nas construções como um material com propriedades cimentantes.

Na Europa, os materiais intitulados como tufos vulcânicos também foram empregados na produção de argamassa e concreto, já, em outras regiões, aplicara-se a argila calcinada.

Nos dias atuais a era ecológica que visa atender aos quesitos de economia e de tecnologia ampliou o consumo de adições minerais em concretos e argamassas, empregando materiais com propriedades pozolânicas.

A origem das pozolanas pode ser do tipo industrial como as sílicas ativas provenientes de siderúrgicas; as escórias de alto forno provenientes de usinas termoelétricas, bem como as agrícolas como a cinza de casca de arroz (MEHTA e RAMACHANDRAN, 1984).

A utilização de pozolanas visando reduzir o consumo do aglomerante cimento é muito vantajosa uma vez que estas possuem poder aglomerante quando em contato com a umidade e temperaturas ambientes reagindo com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) para formar os compostos cimentantes (SANTOS, 1992; LEA, 1971; PRUDÊNCIO JUNIO *et al.*, 2003; WEBER, 2001; NEVILLE 1997; CINCOTTO 1988; SILVEIRA *et al.*, 1996; COIMBRA *et al.*, 2002, OLIVEIRA, 2006).

A substituição de porcentagens dosadas de cimento por pozolanas controlam a formação de cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , aumentando a densidade da pasta e as regiões de interface de ligação entre pasta agregado. JOHN *et al.* (2003) descreveram que a reatividade potencial de um material está intimamente ligada à quantidade de  $\text{SiO}_2$ , sendo que esta deve ser superior à 44% para se obter uma boa reação com o hidróxido de cálcio livre oriundo das reações químicas do cimento. Conforme citado por CARMO (2006) e TAYLOR (1990), o cimento Portland quando totalmente hidratado pode produzir cerca de 15 a 28% da sua massa em  $\text{Ca(OH)}_2$ , o que de fato não ocorre, como apresentado por NEVILLE (1997). Segundo NEVILLE (1997) o cimento Portland durante as suas reações químicas pode resultar em cerca de 20% da sua massa em  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Como descrito por NEVILLE (1995 e 1997); COUTINHO (1997); MEHTA e MONTEIRO (1994); e MONTANHEIRO *et al.* (2002a), as pozolanas podem ser classificadas como de origem natural ou artificial, sendo que as naturais possuem atividade pozolânica no seu estado natural, ou podem ser facilmente transformadas em pozolanas, aplicando-se para tal um processo de calcinação e moagem. As pozolanas artificiais, de origem industrial não necessitam obrigatoriamente de secagem e moagem para atuar como pozolana.

GONÇALVES *et al.* (2003) e ÇOLAK (2003) descreveram em seus trabalhos que a pozolana oriunda da metacaulinita quando substituída parcialmente no cimento reduz a porosidade total acessível à água, acrescentando uma resistência mecânica ao compósito.

Por ser um material fino a pozolana, quando mal dosada, pode provocar a retração em argamassa aumentando proporcionalmente com a quantidade de finos (BASTOS *et al.* 2005).

BASTOS (2001) comentou que o aumento do teor de finos, melhora a capacidade de retenção de água, porém, diminui o diâmetro dos capilares da argamassa gerando desta forma tensões internas à argamassa quando do processo de perda de água para o meio ambiente e para o substrato.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS

A classificação dos materiais pozolânicos, tendo como base a sua origem, pode atender tanto a norma NBR 12653/92, bem como a *American Society for Test and Materials* (ASTM C 618-95), apresentadas no Quadro 2.2 e 2.3.

Quadro 2.2 – Classificação das pozolanas conforme a NBR12653/92

Classe	NBR 12653/92
N	Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Pozolana produzida pela combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas.
E	Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

Quadro 2.3 – Classificação das pozolanas conforme ASTM 618-95

Classe	ASTM 618-95
N	Pozolanas cruas ou calcinadas, oriundas de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos; turfos vulcânicos e argilas.
F	Cinza volante produzida pela incineração de carvão betuminoso ou antracito, tendo atividade pozolânica.
C	Cinza oriunda de carvão betuminoso ou lignina, apresentado propriedades pozolânicas e cimentantes. Algumas cinzas volantes de classe C podem apresentar porcentagens de cal superiores a 10%.

## 2.7 TIPOS DE MATERIAIS POZOLÂNICOS

As pozolanas de origem artificial podem ser obtidas como segue:

- cinzas volantes. São, normalmente, oriundas de usinas termoelétricas, onde o carvão é pulverizado como combustível de queima. Sua combustão é realizada a temperaturas elevadas entre 1200 a 1600 °C em caldeiras. A permanência do carvão em chama oxidante como descrito por SILVA *et al.* (1999) é de dois segundos. Este tempo é necessário para sua total fusão, acarretando na geração de cinza volante e cinza pesada. As cinzas volantes possuem textura fina sendo carregadas pelos gases de combustão até os coletores eletrostáticos (FREITAS JÚNIOR, 2005). As cinzas pesadas são acondicionadas no fundo da fornalha e removidas hidráulicamente por meio de fluxo de água as quais, ocupando cerca de 20% da produção total de cinza, não se empregam como adição em concretos e argamassas;
- sílica ativa. Esta é originada na obtenção do ferro-silício, atuando como desoxidante e sílico-metálico na fabricação de componentes eletrônicos, silicones e alumínio. Sua produção ocorre em temperaturas superiores a 2000 °C com a redução do quartzo e silício, gerando monóxido de silício (SiO) que é transportado na forma gasosa para o topo do forno. Sua oxidação se dá em contato com o ar, formando partículas muito finas de

dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), sendo estas coletadas e armazenadas (MEHTA e RAMACHANDRAN, 1984; AITCIN, 2000; MENDES, 2002; ANJOS, 2004).

- Metacaulim. Este composto é obtido da calcinação de argilas caulinitas e caulins em temperaturas que variam de 600 a 900 °C, que propiciam a geração de um material amorfo altamente instável quimicamente, denominado metacaulinita, passando seguidamente por um processo de moagem que lhe confere elevada área superficial das partículas ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) (ROCHA e VASCONCELOS, 2006; ISAIA, 2007 e SHVARZMAN *et al.*, 2003).
- cinza de casca de arroz. O material é produzido na combustão da casca de arroz durante o processo de geração de energia e parboilização do arroz. Quando queimada em temperaturas controladas entre 500 e 700 °C, produzem cinzas amorfas de alta pozolanicidade, ao passo que quando não controladas apresentam minerais de sílica não reativos e com baixo valor pozolânico (ISAIA, 2007; MORAES, 2001; WEBER, 2001; PRUDÊNCIO JUNIOR *et al.*, 2003 e SANTOS, 2006).
- escória granulada de alto forno. Material obtido em alto-fornos durante a produção do ferro-gusa, pela mistura de impurezas encontradas no minério de ferro, juntamente com calcário, dolomita e cinzas de coque. Quando resfriadas lentamente ao ar, produzem fases cristalinas diferentes e, em consequência disso, perdem ação cimentante, e quando resfriadas bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão, apresentam-se com material amorfo e altamente reativo (ISAIA, 2007 e AITCIN, 2000);
- cinza de casca da castanha de caju. A sua produção ocorre após mistura da casca com cardol durante o processo de decorticação, que separa a casca da castanha. A cinza é obtida com a queima da casca para a geração de calor nas caldeiras de decorticação (LIMA *et al.*, 2008 e ARAUJO *et al.*, 2008).

## 2.8 CLASSIFICAÇÃO QUANTO A ATIVIDADE CIMENTANTE, POZOLÂNICA E FILER

METHA e MONTEIRO (1994) e SWAMY (1992) apresentaram em seus trabalhos uma classificação quanto a atividades cimentantes e pozolânicas dos

materiais. Segundo os mesmos autores a composição química e mineralógica e a característica das partículas influenciam no comportamento destes quando aplicados em concretos ou argamassas.

CYR *et al.* (2006) e LAWRENCE *et al.* (2005) descreveram que as características das partículas como a sua granulometria e a área específica, tanto nas idades iniciais como nas finais, estão diretamente ligadas à ocorrência dos efeitos pozolânicos, ocasionado pelo efeito *filler*.

Na Tabela 2.1, está apresentada a classificação das pozolanas quanto ao seu diâmetro e a sua área específica e, na Tabela 2.2, a classificação e composição dos materiais pozolânicos, cimentantes e filler.

Tabela 2.1 – Classificação das pozolanas quanto ao diâmetro e área específica

Material	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Área específica ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
Sílica	0,02 a 1 (HOLLAND, 2005 e MENDES, 2002)	13000 a 25000 (MEHTA e MONTEIRO, 2008; MENDES, 2002 e MEHTA, 1996)
Metacaulim	12 a 146 (VIZCAYNO <i>et al.</i> , 2009)	4023 a 12000 (ROSSIGNOLO e OLIVEIRA, 2006 e KHATIB e WILD, 1996)
Casca de arroz	5 a 10 (ZHANG <i>et al.</i> , 1996 e AGOPYAN, 1991)	500 a 18.500 (SANTOS, 2006 e AGOPYAN, 1991)
Cana-de-açúcar	1 a 14 (PAULA, 2006)	2400 (PAULA, 2006)
Cimento Portland	45 (HOLLAND, 2005)	235 a 560 (ROSSIGNOLO e OLIVEIRA, 2006)
Cinza volante	1 a 150 (MEHTA e MONTEIRO, 1994 e 2008)	3000 a 4000 (MEHTA e MONTEIRO, 1994 e 2008)
Escória de alto forno	10 a 45 (MEHTA e MONTEIRO, 1994)	500 MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Tabela 2.2 – Classificação e composição dos materiais pozolânicos, cimentantes e filer (MEHTA e MONTEIRO, 1994 e ISAIA, 2007)

Classificação	Adição mineral	Composição química e mineralógica	Características da partícula
Cimentante	Escória granulada de alto-forno	Silicatos contendo Ca, Mg, Al e Si.	Possui dimensões de agregado miúdo. Passam pelo processo de secagem e moagem ficando com dimensões inferiores a 45 $\mu\text{m}$ (50 $\text{m}^2/\text{g}$ obtido por Blaine).
Cimentante e pozolânicos	Cinza volante com alto teor de cálcio	Vidro de silicato, possui em sua composição Ca, Mg, Al, alcalis e baixo teor de $\text{C}_3\text{A}$ .	Material fino com porcentagens entre 10% e 15% maiores que 45 $\mu\text{m}$ ((30 a 40) $\text{m}^2/\text{g}$ obtido por Blaine).
Pozolanas altamente reativas	Sílica Ativa	Composto por Si puro não cristalino	Material fino com dimensões inferiores a 1 $\mu\text{m}$ (130 a 300) $\text{m}^2/\text{g}$ – Absorção por nitrogênio – BET).
	Cinza de casca de arroz	Composto por Si puro não cristalino	Partículas com dimensões inferiores a 45 $\mu\text{m}$ .
Pozolanas industriais	Cinza volante	Celerado contendo Al, Fé e álcalis. Possui pequena quantidade de material como tipo quartzo, magnetita e hematita.	Material fino com partículas que variam de (1 a 150) $\mu\text{m}$ , porém maior parte menor que 45 $\mu\text{m}$ ((20 a 80) $\text{m}^2/\text{g}$ obtido por Blaine).
	Materiais comuns	Composto por quartzo, feldspato e mica	Partículas são moídas até atingir dimensões menores que 45 $\mu\text{m}$ .
Pozolanas pouco reativas	Cinza de grelha, de escória e de casa de arroz queimada no campo.	Silicatos cristalinos de com pequena quantidade de matéria não-cristalina.	O material moído com dimensões inferiores a 45 $\mu\text{m}$ para desenvolver atividade pozolânica.
Filer	Calcáreo, pó de quartzo, pó de pedra.	Variável conforme o material estudado.	Não possui atividade química, porém auxilia no empacotamento granulométrico.



## 2.9 REAÇÃO POZOLÂNICA

A reação pozolânica, como descrito por SIVEIRA e RUARO (1995); LEITE e MOLIN (2002); CARMO, (2006); ISAIA (2007), SABIR *et al.* (2001), é a capacidade da pozolana, seja ela natural ou artificial, em reagir com a cal, tendo como produto final um material cimentante (silicato hidratado de cálcio – C-S-H), como apresentado na reação química seguinte:



Segundo LEITE e MOLIN (2002), WEBER (2001), SHI (2002), TORRES *et al.* (1999) a atividade pozolânica é conseguida quando estes são queimados a temperaturas que variam de 500 a 900 °C. Um dos fatores importantes existentes nas pozolanas é o efeito microfiller, termo utilizado para demonstrar que a finura da pozolana é muito maior que a do aglomerante cimento, cerca 60% à 80% menor (LEITE e MOLIN, 2002; MORAES e TEZUKA, 1992; CARMO, 2006).

O fator microfiller propicia um melhor empacotamento entre as partículas de pozolana e cimento, onde estas diminuem o espaço disponível para a água, tornando as pastas mais densas. Em consequência deste fato, acarretam no aumento de resistência mecânica à compressão e durabilidade (Ibidem).

As pozolanas são materiais que apresentam hidratação lenta, bem como liberam pouco calor durante sua reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sendo este importante para os concretos e argamassas (COIMBRA *et al.*, 2002; TURANLI *et al.*, 2004; SANTOS, 2006; SHANNAG *et al.*, 1995 e MEHTA e MONTEIRO, 2008). A pozolana é comumente adicionada aos cimentos Portland do tipo: CPIV; CPV ARI – RS e CPII – Z.

## 2.10 EFEITOS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS POZOLANAS

Os efeitos físicos e químicos das pozolanas estão diretamente relacionados com a reação  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formar o silicato hidratado de cálcio - C-S-H (ISAIA, 2007). Conforme pré-descrito pela norma NBR 12653/92 as exigências químicas e físicas estão apresentadas no Quadro 2.4 e 2.5.

Quadro 2.4 – Exigências químicas para os materiais pozolânicos (NBR 12653/92)

Propriedades	Classe dos materiais pozolânicos		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% mínima)	70	70	50
SO <sub>3</sub> (% máxima)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máxima)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máxima)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O (% máxima)	1,5	1,5	1,5

Onde: N – materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, terras diatomáceas e argilas calcinadas; C – cinzas volantes oriundas da queima do carvão em usinas termelétricas; e, E – qualquer pozolana que não se enquadram nas classes anteriores, conforme estabelecido na norma NBR 12563/92.

Quadro 2.5 – Parâmetros físicos conforme estabelecido pela norma NBR 12563/92

Propriedades	Classe dos materiais pozolânicos		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm (% máxima)	34	34	34
Índice de atividade pozolânica aos 28 dias com cimento (% mínimo)	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)	6,0	6,0	6,0
Água requerida (% máxima)	115	110	110

A norma ASTM C 618-95 tem como parâmetros mínimos de 70% de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; e, máximos, de 5% de SO<sub>3</sub> e 1,5% de Na<sub>2</sub>O.

## 2.11 UTILIZAÇÃO DA POZOLANA EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

A finura das pozolanas exerce influência nas propriedades das pastas, concretos e argamassa, pois quanto mais finas as cinzas maiores são as suas atividades pozolânicas, porém, tal material, por ser fino, e quando mal dosado, pode provocar a retração em argamassa, aumentando à medida que a quantidade de finos aumenta (BASTOS *et al.*, 2005 e SHANNAG *et al.*, 1995).

A vantagem principal da utilização da pozolana como descrito por OLIVEIRA *et al.* (2004) e OLIVEIRA E BARBOSA (2006) é a capacidade de reagir com os hidróxidos de cálcio, formando novos compostos como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Segundo OLIVEIRA *et al.* (2004) e MALQUORI (1960) as vantagens propiciadas pela pozolana quando empregadas em argamassas e concretos são: redução da reação álcali/agregado; aumento da resistência mecânica; redução da permeabilidade e do calor de hidratação.

Nos primeiros instantes de mistura dos componentes dos concretos e argamassas a pozolana atua como material de preenchimento. Ao longo do processo de hidratação do cimento, as partículas de pozolana reagem removendo o excesso de hidróxido de cálcio da pasta de cimento, conferindo à mesma mais homogeneidade.

## 2.12 CINZAS DE FOLHA DE BANANA

O Brasil é um grande produtor de frutas, sendo que a banana ocupa o segundo lugar após os cítricos, com uma produção anual de 6,0 milhões de toneladas, cultivada em uma área próxima de 513 mil hectares como descrevem SILVA e TORRES FILHO (1997), SENA (2011). A produção média de pés de banana é de 1333 a 1666 plantas por hectare como descrito por BORGES (2004) e EMBRAPA (2012), o que gera em média 854,66 milhões árvores de banana cultivadas anualmente.

Com uma geração média, os pés de bananeira produzem cerca de 1340 g de folhas secas, o que representa, anualmente, um potencial nacional de sua geração de cerca de 11,45 milhões de toneladas, o que corresponde a 1,21 milhões de toneladas de cinza de folha de bananeira (KANNING, 2010).

No Paraná, a produção de banana concentra-se principalmente na região litorânea, ocupando 80% da área, entre o litoral norte e sul (IAPAR, 2008), haja vista que a bananeira, por ser uma fruta de clima tropical, apresenta um melhor desenvolvimento em climas com temperatura média anual na ordem de 22 °C com precipitações pluviométricas superiores a 1200 mm/ano.

A bananeira possui um ciclo de crescimento mais acentuado para tempos quentes e úmidos, onde a planta e seus cachos se desenvolvem mais rapidamente (MANICA, 1997).

As variações na altitude influenciam na duração do ciclo da bananeira, sendo mais produtivas em regiões tropicais com altitude máxima de 300 m acima do nível do mar, favorecendo o ciclo de produção entre 8 a 10 meses, ao passo que altitudes próximas a 900 m acima do mar este tempo é equivalente há 18 meses (EMBRAPA, 2012).

A limpeza com a retirada das folhas velhas, totalmente secas, mortas, doentes ou pendentes, favorece o fluxo de ar interno do bananal, melhorando a luminosidade e diminuindo os frutos lesionados. A referida limpeza propicia também, o desenvolvimento das plantas facilitando o desbaste a aplicação de defensivos, o movimento de máquinas e agilidade na colheita dos cachos (Ibidem).

A folha de bananeira apresenta atividade pozolânica quando calcinada a uma temperatura de 850 °C, sob fluxo de ar, e tempo de queima de 1 h. A granulometria da cinza resultante pode ser ajustada para a mistura em argamassa e concreto em moinho de bolas (KANNING, 2010).

Tal como as cinzas citadas, segundo LIMA *et al.*, 2007 apud JOHN *et al.*, 2003, qualquer cinza vegetal, desde que em estado amorfo, finura adequada e composição química com elevado teor de sílica podem ser empregados como adição mineral. A adição mineral não só diminui o custo da produção de concretos e argamassas, por serem energeticamente mais econômicos, como propicia a redução da reação álcali-agregado e do calor de hidratação gerado pelos cimentos (SANTOS, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2006; NAWY, 1996 e SANTOS, 1992). MEHTA (1994); CINCOTTO E KAUPATEZ (1988) e KANNING (2010) apresentaram em seus trabalhos um levantamento da porcentagem de cinza gerada durante a queima de alguns materiais como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Quantidade de cinza produzida para cada material queimado MEHTA (1994); CINCOTTO E KAUPATEZ (1988); KANNING (2010) e ROMERO (2011)

<b>Produto</b>	<b>Cinza (% em massa)</b>	<b>Produto</b>	<b>Cinza (% em massa)</b>
<b>MEHTA (1992)</b>		<b>CINCOTTO E KAUPATEZ (1988)</b>	
Folha de trigo	10,0	Bagaço de cana-de-açúcar (seco)	0,5
Folha e talo de girassol	11,0	Amendoim	3,0
Folha de milho	12,0	Mamona	9,0
Folha de sorgo	12,0		
Palha de arroz	14,0	Casca de arroz	18,0
Bagaço de cana-de-açúcar (úmido)	15,0		
Casca de arroz	20,0		
<b>KANNING (2010)</b>		Folha de bananeira	10,57
<b>ROMERO (2011), FIESP/CIESP (2001)</b>		Bagaço de cana-de-açúcar	2,4*

\* - 2,4% de cinza que apresenta também na sua constituição pó de carvão e areia de quartzo.

## 2.13 CONSUMO DE ARGAMASSAS NO BRASIL

CAPOZZI (1996) evidencia o alto consumo de argamassas, salientando que 37% dos edifícios em obra, na cidade de São Paulo, usam revestimentos argamassados e com acabamento de pintura sobre as fachadas.

No Brasil, são freqüentes os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas (chapisco, emboço e reboco), tanto na vedação interna, como externa. Isto ocorre, principalmente, em habitações para pessoas de média e baixa renda, onde as placas à base de cimento e agregados minerais totalizam 20% do custo médio das obras (SANTIN, 1996).

Em 1986, o consumo de argamassas nas obras brasileiras chegou ao patamar de 0,137 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> construído, incluindo o desperdício, que é elevado para este tipo de material. Em 1997, o consumo brasileiro foi da ordem de 0,13 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de construção, sendo destes, 0,035 m<sup>3</sup> para revestimento interno, 0,04 m<sup>3</sup> para contrapiso e 0,05 m<sup>3</sup> para revestimento externo (LICHTENSTEIN, 1986).

## 2.14 ARGAMASSA, REVESTIMENTOS E SUAS FUNÇÕES

A argamassa pode ser conceituada como um material complexo, constituído essencialmente de materiais inertes de granulometria entre 4,8mm e 1,5mm (agregados miúdos) e de uma pasta com propriedades aglomerantes, composta por minerais e água (materiais ativos), podendo ser composta, ainda, por produtos especiais, denominados aditivos e adições (SABBATINI, 1986).

Os revestimentos de argamassas têm, em geral, as seguintes funções: proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos e, por consequência, evitar a degradação precoce das mesmas; aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção dos edifícios; contribuir para o isolamento termoacústico, estanqueidade à água e aos gases e segurança ao fogo; estéticas, de acabamento e melhorar a valorização da construção ou determinação do padrão do edifício (SABBATINI, 1986).

A norma ABNT NBR 13529/95, define a argamassa para revestimento como sendo *“uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”*. Nesta mesma norma brasileira estão definidos outros termos usuais envolvendo o revestimento executado à base de cimento e cal, ou ambos, quanto ao campo de sua aplicação. Podem-se encontrar definições como: adições, que normalmente compreendem: os materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento; argamassa de cal, preparada com cal como único aglomerante; argamassa de cimento, preparada com cimento como único aglomerante; e revestimento, assim denominado o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas, em espessura uniforme, apta a receber um acabamento final.

### 2.14.1 Argamassa de revestimento

A argamassa de revestimento, conforme SABBATINI (1986) e a norma NBR 13529/95, aplica-se a paredes, pisos e tetos, em camada única, ou para chapisco, emboço e reboco. Permite que os acabamentos de superfície sejam: i) somente sarrafeados no caso de aplicação posterior de reboco; ii) desempenado ou

sarrafeado no caso de revestimento posterior de placas cerâmicas; e, iii) desempenado ou chapiscado, no caso do reboco constituir uma única camada de revestimento.

As características ideais dos revestimentos argamassados descritas na norma NBR 13529/95 e por CARASEK (2007) são:

- ter compatibilidade com o acabamento decorativo do revestimento superficial;
- ter resistência mecânica uniforme;
- ser constituído por uma ou mais camadas de argamassas uniformes;
- ter propriedade hidrofugante;
- ter propriedade impermeabilizante, quando aplicado como revestimento externo em contato com o solo;
- resistir à ação de variações normais de temperatura e de umidade;
- apresentar textura uniforme, sem imperfeições, como: cavidades; fissuras; manchas e eflorescências;
- prover e garantir a aderência do revestimento, como prumo; nivelamento; alinhamento e planicidade quando houver necessidade de empregar revestimento com espessura superior aos valores do Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Espessura mínima e máxima do revestimento (NBR 13749/96)

<b>Revestimento</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Parede interna	$5 \leq e \leq 30$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Tetos internos e externos	$e \leq 20$

#### 2.14.2 Trabalhabilidade, consistência e plasticidade

A trabalhabilidade é a facilidade do pedreiro trabalhar com a argamassa, sendo, o conjunto de fatores da argamassa que conferem boa qualidade e produtividade na sua aplicação, como: relação água/aglomerante; aglomerante/agregados; granulometria; formato dos grãos e tipo de aglomerante. Para argamassas de revestimento, traduz-se em uma adequada aderência ao substrato e a facilidade de acabamento superficial (RILEM, 1982 e KAZMIERCZAK,

2004). SELMO (1989) descreve que a argamassa de revestimento deve apresentar boa trabalhabilidade, deixando-se penetrar com um mínimo de esforço pela colher do pedreiro e quando lançada sobre o substrato deve manter-se coesa e úmida o suficiente para ser espalhada, sarrafeada e ainda receber o tratamento superficial desejado.

Diferente da trabalhabilidade que está relacionada com o emprego da argamassa, a consistência é definida como sendo um valor numérico que caracteriza a sua fluidez. Segundo ISAIA (2007); SILVA (2006) e CINCOTTO *et al.* (1995), a consistência das argamassas é correspondente à resistência que apresentam quando solicitadas por uma tensão ainda no estado fresco, estando estas relacionadas com a trabalhabilidade, a quantidade de água empregada na mistura, o teor de ar incorporado, a natureza e a quantidade de aglomerante. As consistências das argamassas se classificam como secas; plásticas e fluídas.

A plasticidade é a propriedade que a argamassa apresenta em reter a deformação, quando reduzido o esforço de deformação sobre ela imposto (CASCUDO *et al.*, 2005).

#### 2.14.3 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade em que uma argamassa apresenta no seu estado fresco em reter a água empregada na mistura, quando em contato com uma superfície absorvente ou quando em processo de evaporação (CINCOTTO, 1995). Segundo GUIMARÃES (2002) como a retenção de água interfere na consistência das argamassas provocando a redução da trabalhabilidade, esta também apresenta papel fundamental nos processos de aplicação, regularização e no seu desempenho. A retenção de água também influencia nas propriedades das argamassas no estado endurecido, uma vez que a falta de água para hidratação das partículas de cimento acarretam em perdas de resistências mecânicas e durabilidade.

#### 2.14.4 Massa específica aparente e teor de ar incorporado

A massa específica aparente é um parâmetro que possibilita fornecer informações qualitativas referentes da compacidade da mistura, bem como, é a



relação entre a massa dos constituintes empregados na argamassa e o volume que estes ocupam (CARASEK, 2007; MATTOS *et al.*, 2002; MACIEL *et al.*, 1998 e CINCOTTO, 1985). Naturalmente, as argamassas apresentam vazios que muitas vezes são criados pelo ar aprisionado durante o processo de mistura, ou oriundos da evaporação da água de amassamento. Quanto maior o teor de ar incorporado, maior a trabalhabilidade das argamassas, porém, o excesso de ar incorporado, pode reduzir a resistência de aderência dos revestimentos devido à reduzida ligação entre pasta/agregado.

#### 2.14.5 Reologia

O termo reologia originado do grego *rheo*= fluxo e *logos*= estudo, apresenta como significado o estudo da deformação e escoamento da matéria (TANNER, 1988 *apud* RAGO, 1999). Conforme descrito por PILEGGI (2006) e COSTA (2006) é a ciência que estuda o comportamento do fluxo e a deformação quando os materiais estão submetidos a carregamentos, tensões ou forças mecânicas.

Usualmente, a reologia é adotada para analisar o comportamento de fluídos; líquidos; emulsões; e suspensões de partículas, onde se correlaciona a taxa de deformação de um determinado material com a tensão submetida. A classificação está baseada em modelos lineares relacionando uma deformação sofrida por um material devido a uma tensão aplicada sobre o mesmo. Os modelos para líquidos foram estudados por Isaac Newton (1642-1727), enquanto os modelos para sólidos à Robert Hooke (1635-1703) (ANTUNES, 2005; PILEGGI, 2006). Os modelos para líquido e para sólidos expressam uma diferença importante no comportamento dos materiais, sendo que o fluido quando sujeito a uma determinada tensão escoar ao passo que um sólido se deforma.

Classificando-se como suspensões de partículas, as argamassas são denominadas como fluidos newtonianos, que atendem à Equação 2.1.

$$\tau = \eta \times \gamma \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:  $\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa);

$\gamma$  = taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ );

$\eta$  = viscosidade (Pa.s.).

Embora as argamassas sejam classificadas como fluidos newtonianos, estando enquadradas como suspensões de partículas (COSTA, 2006), as variações de comportamento devido às reações químicas do cimento podem acarretar em mudanças de classificação passando de fluidos Newtonianos que apresentam um comportamento viscoso linear, como é o caso da água, óleos, ar e gases, para fluidos de Bingham; fluidos pseudoplásticos ou fluidos dilatantes, podendo estes ser caracterizados a partir das Equações 2.2 e 2.3. Por apresentarem-se no estado fluido quando frescas, as argamassas possuem grande complexidade, pois apresentam em sua composição o aglomerante cimento. Este, em contato com as partículas de água (H<sub>2</sub>O) passa a reagir quimicamente iniciando seu processo de hidratação, cuja consistência vai se modificando ao longo do tempo, passando desta forma de um fluido para um sólido (ANTUNES, 2005 e PILEGGI *et al.*, 2003).

$$T = m \left( \frac{dv}{dx} \right)^n \quad \text{Equação 2.2}$$

$$\mu = m \left( \frac{dv}{dx} \right)^{n-1} \quad \text{Equação 2.3}$$

onde:  $T$  = tensão de cisalhamento exercida (Pa);

$m$  = viscosidade plástica do fluido (Pa.s<sup>n</sup>);

$\mu$  = viscosidade aparente (Pa.s.);

$dv/dx$  = velocidade de carregamento perpendicular à direção de cisalhamento (s);

$n$  = índice de característica reológica, sendo que para  $n < 1$  o fluido é pseudoplástico; para  $n > 1$  o fluido é dilatante e para  $n = 1$  o fluido é newtoniano.

O efeito pseudoplástico é caracterizado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de escoamento, tendo como exemplo as emulsões, grandes moléculas de polímeros em um solvente e dispersões, pois se tornam mais finos quando recebem as tensões de cisalhamento.

Seu comportamento, como descrito por SILVA (2011), pode ser observado na Figura 2.7, em que a relação  $S \times F$  é menor do que 1. A curva gerada inicia-se a

partir do ponto de intersecção do gráfico com a tensão de cisalhamento, conhecido como tensão de escoamento e seu comportamento corresponde à viscosidade do material.

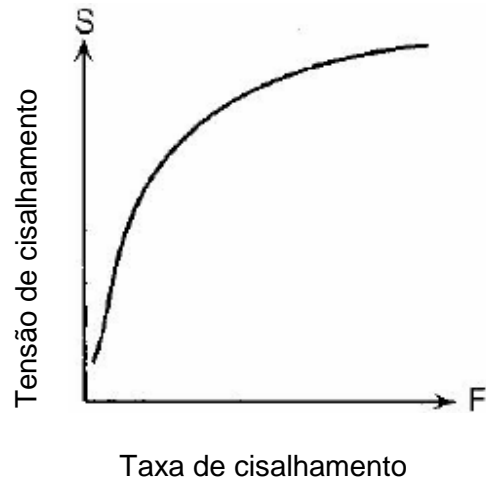


Figura 2.3 – Comportamento característico de um fluido pseudoplástico

Os fluidos dilatantes apresentam comportamento reverso ao fluido pseudoplástico, uma vez que estes aumentam sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, ou seja, a relação  $S \times F'$  é maior do que 1, como observado na Figura 2.8.

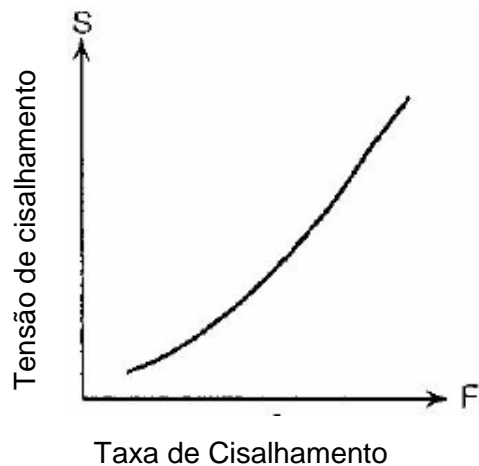


Figura 2.4 - Comportamento característico de um fluido dilatante

Os fluidos de Bingham têm comportamentos Newtonianos onde o fluido passa a se comportar como um sólido em condições estáticas, sendo necessária a aplicação de uma força de cisalhamento para o que o mesmo escoar. O comportamento observado na Figura 2.9 relaciona duas argamassas com

consistências diferentes quando submetidas a uma determinada tensão de carregamento, sendo que esta é maior para a argamassa A do que para a argamassa B.

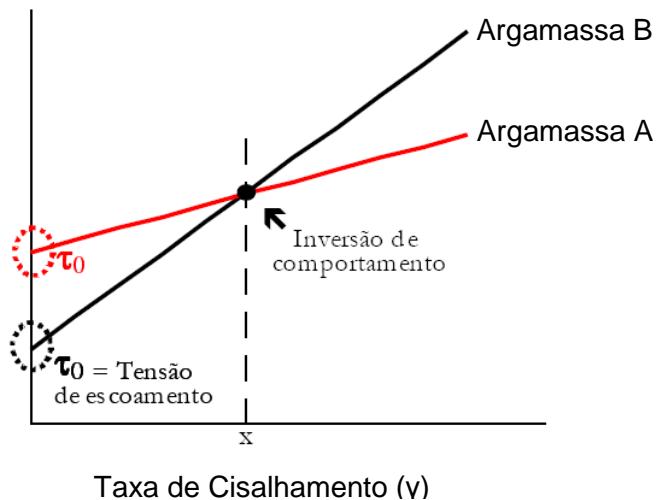


Figura 2.5 – Exemplos de fluidos de Bingham para duas argamassas  
(adaptado de BANFILL, 2005)

O carregamento inicial demonstrado pelo eixo das tensões de cisalhamento é maior para a argamassa A, demonstrando que esta apresenta maior consistência que a argamassa B, ou seja, esta necessita de um carregamento maior que a argamassa B para iniciar o seu escoamento. Ao longo do escoamento as argamassas apresentam um mesmo ponto de tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento. A partir deste ponto os materiais passam a apresentar comportamentos diferentes, sendo que, para a argamassa B, os carregamentos passam a ser maiores que a A para um mesmo descolamento (BANFILL, 2005).

#### 2.14.6 “Squeeze-Flow”

A utilização do método para a caracterização reológica por “squeeze-flow” de materiais com bases cimentícias teve início com o trabalho desenvolvido por Min *et al.* (1994), adaptando-se a técnica empregada para a caracterização de alimentos, cosméticos, materiais cerâmicos e polímeros, para uma pasta de cimento (CARDOSO *et al.*, 2005).

O ensaio fundamenta-se na deformação efetiva do material gerada por cisalhamento radial (COSTA, 2005), quando a razão do diâmetro ( $D$ ) da amostra com a sua espessura ( $h$ ) forem maiores que 5 ( $D/h > 5$ ) (BETIOLI, 2009). Quando inferiores as tensões passam a ser de compressão (MEETEN, 2004; COSTA, 2006).

O ensaio de reometria por “squeeze-flow” visa analisar o comportamento de um material no formato cilíndrico quando este é submetido pela compressão de duas placas paralelas com deformação ou carregamento controlado (PILEGGI, 2006; KOLENDA, *et al.*, 2003; MIN *et al.*, 1994). O resultado final caracteriza-se por uma relação entre carga *versus* deslocamento definidas em três regiões distintas, como mostradas na Figura 2.10 (PILEGGI, 2006; CARDOSO *et al.*, 2010; MIN *et al.*, 1994).

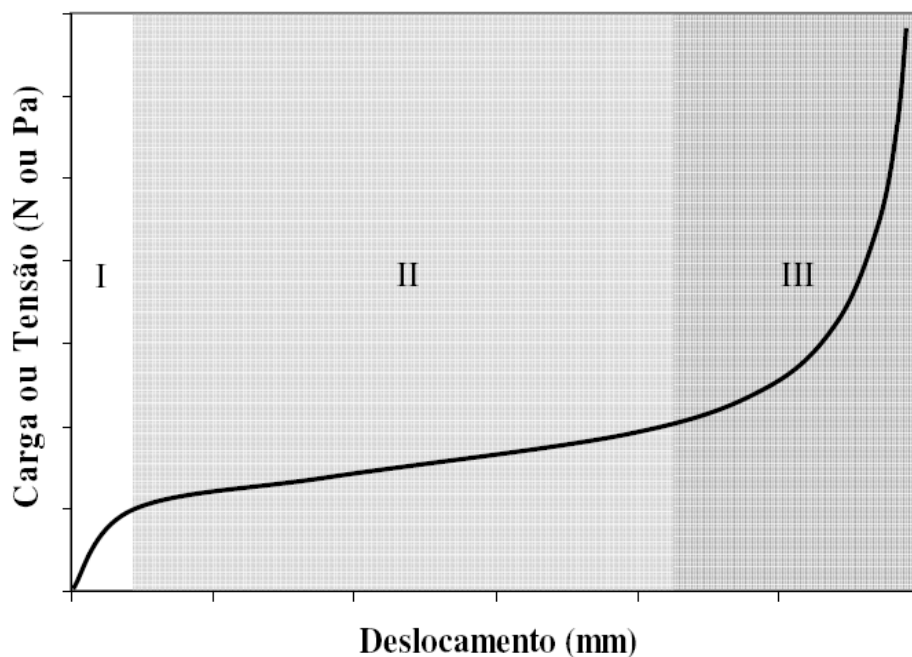


Figura 2.6 – Curva de tensão X deslocamento típica do ensaio por *squeeze-flow* (CARDOSO *et al.*, 2010)

Na primeira região (I) ocorrem pequenas deformações, as quais apresentam características elásticas lineares, atuando como um sólido. Quando uma argamassa tem o mesmo comportamento desta região e não está sujeita a problemas de fissuração, esta tenderá a retornar ao seu estado original, devido a uma recuperação elástica (CARDOSO *et al.*, 2006; CARDOSO *et al.*, 2005).

Na região intermediária (II), as cargas de compressão dos pratos da prensa propiciam uma deformação que supera o comportamento elástico do material, fazendo desta forma com que o mesmo passe a apresentar deformação plástica e/ou viscosa dependendo dos constituintes de cada argamassa. Nesta região o carregamento praticamente não varia, porém, ocorrem grandes deformações, com fluxos elongacionais do tipo biaxial na direção radial ao fluxo (DEALY e WISSRUN, 1999 *apud* VASQUEZ, 2007; CARDOSO *et al.*, 2006; CARDOSO *et al.*, 2005; CARDOSO *et al.*, 2010).

A região final (III) do gráfico, o comportamento tensão pelo deslocamento de uma argamassa passa a ter grandes deformações e grande aumento da taxa de carregamento, o que indica a proximidade entre os arranjos do ensaio (bases da prensa). A proximidade entre as bases da prensa facilita a maior interação entre os constituintes das argamassas uma vez que possibilita o embricamento e o atrito entre os grãos dos agregados, necessitando, desta forma, maior carregamento para um mesmo deslocamento (CARDOSO *et al.*, 2006; CARDOSO *et al.*, 2005).

#### 2.14.7 Difração de raios X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica de grande importância para estudos de materiais pozolânicos. Esta consiste em incidir um feixe de raios X sobre uma amostra, propiciando que os elétrons dos seus átomos vibrem com a mesma frequência do feixe incidente, desta forma, raios X são emitidos para todas as direções e com frequências iguais as do feixe incidente (CULLITY, 1978).

Quando dois ou mais planos de uma estrutura cristalina encontram-se com espaçamentos equivalentes e o comprimento de onda da radiação incidente é de mesma grandeza, ocorre interferência construtiva, atendendo desta forma a condição  $n\lambda = 2d \sin\theta$ , expressa pela lei de *Bragg*, onde “n” corresponde a ordem de difração, “d” é a distância interplanar para os planos hkl, também conhecido como índice de Miller da estrutura cristalina; “λ” ao comprimento de onda da radiação incidente, e “θ” ângulo de incidência dos raios X (CULLITY, 1978; MONTANHEIRO *et al.*, 2003; JOUKOSKI, 2003; BLEICHER e SASAKI, 2000; SOUZA e BITTENCOURT, 2008; OLIVEIRA, 1999; AMORIN, 2007).

Atendendo a equação da lei de Bragg, o feixe difratado pela amostra passa a ser de grande intensidade, o que é peculiaridade de cada estrutura cristalina, haja

vista que inúmeros planos de átomos em uma estrutura cristalina apresentam densidades diferentes de átomos e elétrons. O feixe difratado é coletado por um contador de radiação ou com um filme fotográfico, possibilitando desta forma avaliar os resultados, utilizando-se como referência o catálogo mundial de padrões de difração (ICDD-JCPDS – *International Centre for Diffraction Data*) (QUARCIONI, 2008; JOUKOSKI, 2003; ARAUJO, 2002).

Para a análise de materiais pozolânicos adota-se a técnica de difração de raios X pelo método do pó. Esta técnica possibilita que a radiação incidente na amostra (radiação monocromática), possa ter seu ângulo de incidência variado durante as avaliações. A realização deste ensaio é de suma importância para se analisar qualitativamente um material pozolânico, pois promove a identificação das fases cristalinas presentes nas amostras. A análise se dá pela avaliação dos picos presentes no difratograma e pela comparação com bancos de dados específicos, sendo possível determinar quanto uma amostra é amorfa ou cristalina (JOUKOSKI, 2003; BEZERRA, 2010; MONTANHEIRO, *et al.* 2003) .

#### 2.14.8 Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios-X consiste em uma técnica que possibilita realizar uma análise não destrutiva de materiais, determinando quantitativamente e qualitativamente a composição elementar de uma amostra analisada, baseando-se na medição da intensidade de raios X característicos emitidos pelos elementos que compõem a amostra (BELMONTE, 2005; MORAES, 2009; CALZA, 2010 e SCAPIN, 2004).

A referida técnica se baseia no princípio da absorção de raios-X pela amostra, o que provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como fluorescência de raios-X (BEZERRA, 2010).

Os raios X que incidem sobre a amostra passam a excitar os átomos que a constituem, seguido da emissão de linhas espectrais de energia característica de cada elemento presente na amostra, cuja intensidade está diretamente relacionada à sua concentração. As linhas espectrais são coletadas e analisadas por um computador, possibilitando desta forma realizar a sua identificação (BELMONTE, 2005; MORAES, 2009; SCAPIN, 2004).

#### 2.14.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que propicia verificar a morfologia de superfícies sólidas agrupadas ou em forma de pó, bem como analisar a superfície fraturada, obtendo-se assim micro-análises qualitativas e quantitativas dos materiais (SILVA, 2002).

A varredura se dá por meio de um feixe de elétrons que varrem a superfície da amostra, sendo que os sinais correspondentes podem ser do tipo elétrons secundários; elétrons retro-espalhados e raios X (ALMEIDA, 2005). A topografia da amostra é criada a partir dos elétrons secundários originados das camadas mais externas dos átomos, que depois de saídos das suas camadas eletrônicas são coletados pelo detector, gerando então as imagens. A utilização da técnica por meio de elétrons retro-espalhados possibilita verificar amostras com núcleos atômicos mais pesados, o que dificulta a obtenção das imagens topográficas e de relevo da amostra (MICHLER, 2008; ZHOU, 2006 e MELO, 2002).

A análise química em um microscópio eletrônico é baseada na medida das intensidades e energia dos raios X característicos originados a partir de uma amostra bombardeada por um feixe de elétrons de alta energia, incidente na superfície da amostra. Ao mesmo tempo, parte do feixe eletrônico é refletido e coletado por um detector apropriado, convertendo este sinal em imagem, e desse modo, pode-se obter simultaneamente a análise química e a imagem em uma parte da amostra (SILVA, 2002).

Quando analisada a sua macroestrutura (200  $\mu\text{m}$ ) as argamassas apresentam-se caracterizadas por serem materiais bifásicos, ou seja, uma mistura de aglomerante e água como meio ligante, e os agregados com formas e tamanhos diferentes como elementos inertes. Pela análise da sua microestrutura, por sua vez, tem-se o surgimento da zona de transição entre pasta e agregado, sendo geralmente o ponto mais fraco do compósito, com espessuras que podem variar de 10 a 50  $\mu\text{m}$  e que exercem papel fundamental nas características de resistência mecânica e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As argamassas sem adições de materiais pozolânicos apresentam comumente vasos capilares conectados, com dimensões entre 10 e 50 nm, imperceptíveis a olho nu, os quais possibilitam a percolação de água no seu interior. Quando dosadas com materiais pozolânicos, as argamassas passam a apresentar segmentação dos



canais de percolação de água existentes na pasta de cimento. Esta ocorre devido às pozolanas comumente mais finas que o cimento serem facilmente dispersas na pasta e apresentarem reatividade mais lenta. Quando entram em contato com o hidróxido de cálcio (CH), as partículas de pozolana passam a reagir em diversos pontos distintos formando o silicato hidratado de cálcio (CSH), tornando a pasta mais homogênea e com maior compacidade na zona de transição pasta/agregado. A maior compacidade na zona de transição favorece a redução da exsudação da água, da segregação dos agregados, bem como dos efeitos patológicos decorrentes da ascensão de líquidos por efeito capilar.

A importância desta técnica está ligada às quantidades de informações microestruturais da amostra, bem como a visualização de fases amorfas e cristalinas, oriundas ou não da degradação do compósito, possibilitando efetuar análises químicas elementares das microrregiões analisadas, se houver uma microsonda analítica de raios X acoplada (EDS) (TAYLOR, 1997; PORTELLA, *et al.*, 2001).

#### 2.14.10 Resistência Mecânica

A resistência mecânica é um parâmetro que possibilita fornecer informações qualitativas e quantitativas referentes às características físicas das argamassas, bem como, é a relação entre a carga aplicada em uma área pré-determinada. Suas características relacionam as tensões de compressão, tração ou cisalhamento que uma argamassa está sujeita, e, indiretamente, a natureza e dosagem dos materiais, bem como o fator água/aglomerante (CARASEK, 2007 *apud* SANTOS, 2008; CARASEK, 2007 *apud* CINCOTTO, 1985; ROCHA, 2006).

Naturalmente, as argamassas apresentam vazios que muitas vezes são criados pelo alto fator água/cimento durante o processo de mistura. Como o excesso de água empregado na mistura de uma argamassa não participa integralmente das reações químicas do cimento, esta evapora com o passar do tempo, criando assim caminhos e vazios que acarretam na perda de resistência mecânica. O emprego de materiais pozolânicos propicia a criação de diversos pontos de nucleação dentro da pasta, que interrompe a continuidade dos vasos capilares, aumentando a densidade da amostra e também a sua resistência mecânica e durabilidade.

#### 2.14.11 Resistência de aderência de argamassas

A resistência de aderência das argamassas é um parâmetro muito importante para os revestimentos, pois está relacionada com a absorção de cargas quando solicitadas por tensões normais ou tangenciais na interface de ligação argamassa/substrato, sem se romper (MIRANDA, 2004; ROCHA, 2006; CORINALDESI *et al.*, 2000; MACIEL *et al.*, 1998). A absorção de cargas está relacionada com as propriedades das argamassas no estado fresco; com as características do substrato; com a sua porosidade; rugosidade e condições de limpeza (MACIEL *et al.*, 1998 e CINCOTTO, 1995). SILVA *et al.* (2006) e SABATTINI, (1986) descrevem que a quantidade de cimento influencia no aumento ou diminuição da capacidade das argamassas em resistirem a esforços de tração e, em consequência disso, na capacidade desta em se permanecer aderida ao substrato.

A aderência das argamassas no substrato provém de forças de ligação do tipo Van der Waals geradas pela hidratação do cimento ou pelo intertravamento dos seus constituintes com os poros do substrato durante o processo de sucção e absorção capilar. Embora o aglomerante cimento apresente considerável aderência ao substrato quando comparado com uma argamassa de cal, há, durante as suas reações químicas a liberação de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  que se deposita sobre o agregado e o substrato, criando assim o elo mais fraco do compósito.

É neste contexto que o emprego de materiais pozolânicos torna-se importante, uma vez que as partículas de pozolana ao reagirem com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  formam o silicato hidratado de cálcio (CSH), aumentando assim a densidade da pasta e minimizando desta forma a propagação das fissuras responsável pelas perdas resistências.

#### 2.15 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Conforme verificado na revisão bibliográfica a adição de materiais pozolânicos em concretos e argamassas vem sendo amplamente estudado.

O seu emprego em compósitos a base de cimento visam não somente melhorar as suas propriedades, mas, também, em reduzir os problemas ambientais gerados por estes materiais quando depositados inadequadamente.

A preservação do meio ambiente é uma das grandes preocupações da atualidade, principalmente no que se refere à redução de consumo de energia, da extração de recursos naturais, bem como na geração de materiais pós-consumo.

Neste contexto, é de suma importância a busca por novas tecnologias, bem como o desenvolvimento de pesquisas contemplando o uso de novos materiais como pozolanas que possam ser utilizados como matérias primas para o emprego na indústria da construção civil.

Sendo assim a utilização da cinza de folha de banana como adição em argamassas pode ser viável, podendo colaborar como uma nova tecnologia e resultando em sustentabilidade.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido em duas etapas. A primeira foi constituída da caracterização da cinza de folha de banana tendo-se como base o trabalho desenvolvido por KANNING (2010). A segunda consistiu na caracterização dos materiais utilizados nas argamassas, bem como na dosagem e ensaios no seu estado fresco e endurecido.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este teve como base as etapas descritas na seqüência, visando à elucidação dos objetivos propostos, sendo:

1. aquisição, acondicionamento e transporte dos materiais ou insumos ao laboratório;
2. caracterização físico-química das matérias-primas;
3. caracterização da cinza de folha de bananeira por meio de fluorescência e difração de raios X, visando identificar a natureza química e fases dos minerais cristalinos presentes no material;
4. estudos de dosagem das argamassas sem e com adições minerais;
5. realização de ensaios físicos e mecânicos para a avaliação das propriedades das argamassas em estado fresco e endurecido.
6. estudos microestruturais por microscopia eletrônica de varredura; e a
7. elaboração de um banco de dados com avaliação estatística dos resultados e de desempenho em campo do produto obtido.

A execução dos ensaios descritos na Figura 3.2 teve como função avaliar a característica da argamassa de revestimento, considerando os seguintes parâmetros:

- fator água/(cimento+adição) constante após a determinação da consistência padrão para a argamassa sem adição atendendo aos quesitos da norma NBR 13276/05.
- rompimento de corpos de prova de argamassa segundo as recomendações de norma, em idades de 28, 56 e 91 dias para resistência à compressão simples, à tração na flexão, bem como de absorção de água por capilaridade.

As etapas experimentais estão descritas nas Figuras 3.1 e 3.2.

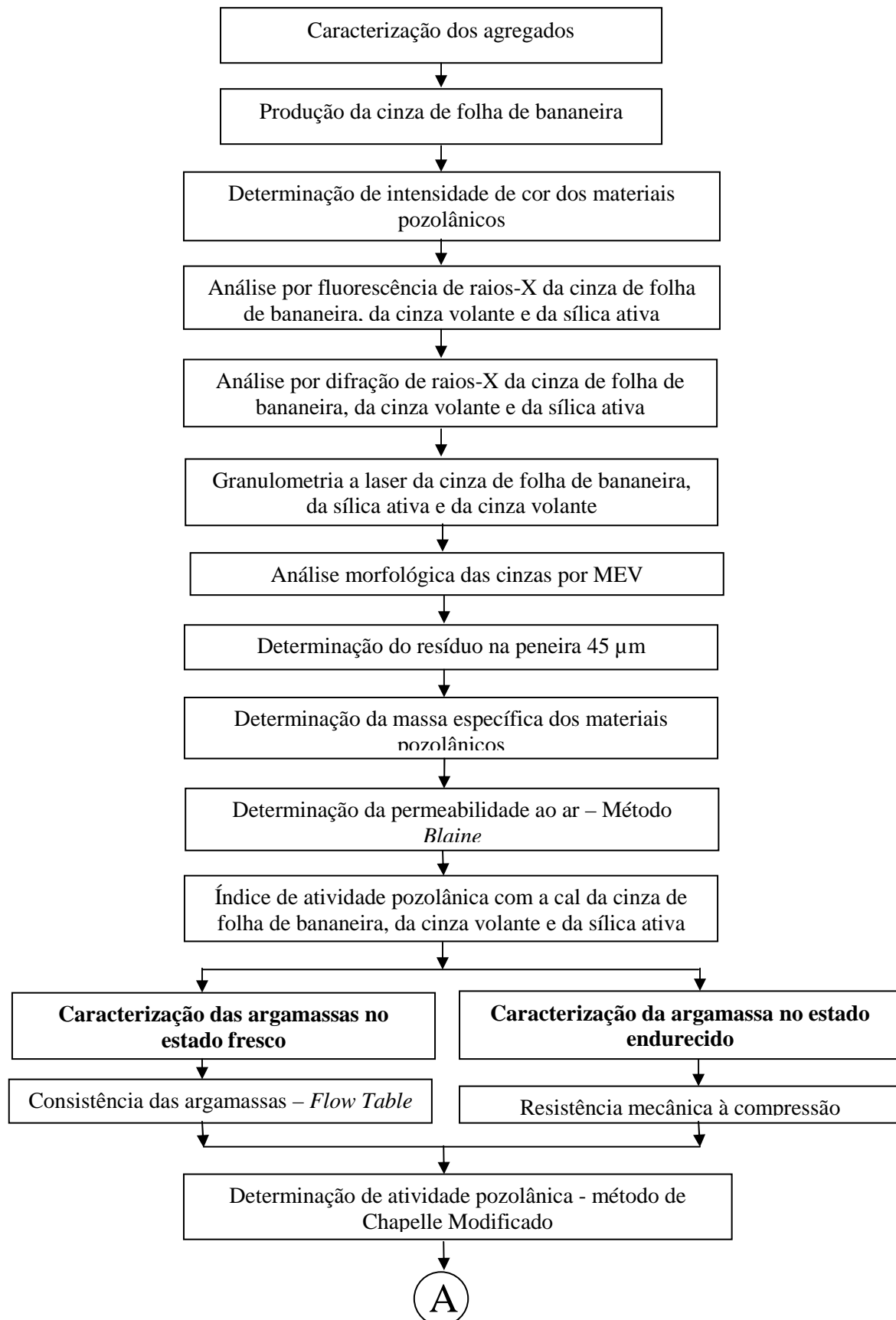


Figura 3.1 – Etapas de ensaio do Programa Experimental (a)

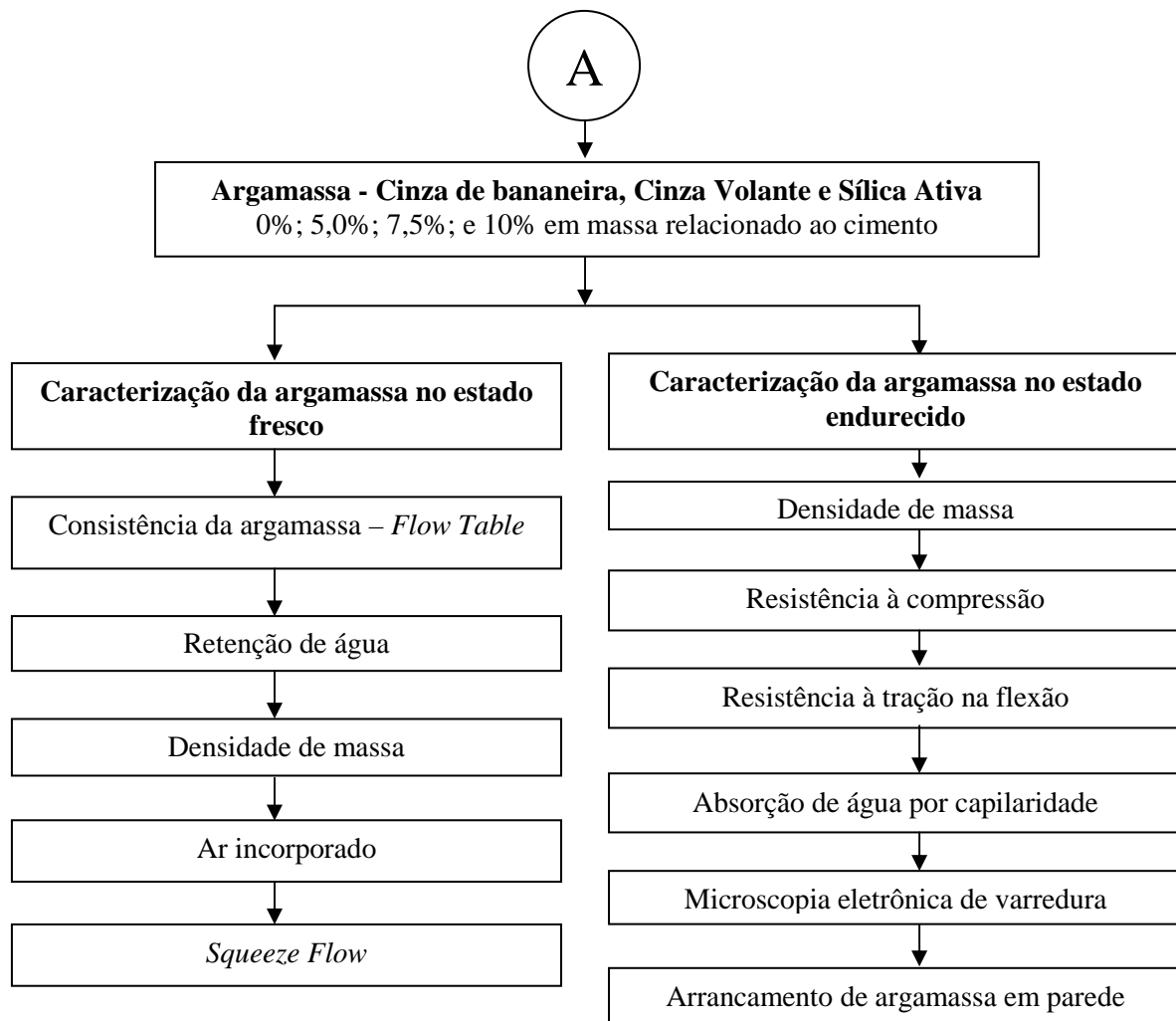


Figura 3.2 - Etapas de ensaio do Programa Experimental (b)

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado na produção das argamassas foi do tipo quartzoso proveniente do Rio Iguaçu na região de Curitiba.

### 3.2.2 Aglomerante

O cimento utilizado foi do tipo CP II-F 32 (cimento Portland composto com filer calcário com resistência mecânica à compressão de 32 MPa, aos 28 dias após

moldado), devido a não existência de materiais pozolânicos em sua constituição, com características apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Características físicas, químicas e mecânicas do Cimento CII – F32

<b>Análise Física</b>	<b>Itambé</b>	<b>Especificação ABNT</b>
Peneira #200 (%)	3,60	≤ 10,0
Peneira #325 (%)	16,90	-----
Água da pasta de consistência normal (%)	25,2	-----
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	-----
Superfície específica <i>Blaine</i> (m <sup>2</sup> /Kg)	3370	≥ 2800
Início de Pega (min)	215	≥ 1,0
Fim de Pega (min)	255	≤ 10,0
Perda ao Fogo	5,19	≤ 6,5
Expansão à quente (mm)	1,0	≤ 5,0
<b>Análise Química (%)</b>	<b>Itambé</b>	<b>Especificação ABNT</b>
Resíduo Insolúvel	1,25	≤ 2,5
<b>Análise Mecânica (MPa)</b>		
<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Especificação ABNT</b>
1	12,1	-----
3	25,6	≥ 10,0
7	31,9	≥ 20,0
28	41,0	≥ 32,0

Fonte: Dados da companhia de Cimento Itambé

Nota-se no Quadro 3.1 que as características químicas, físicas e mecânicas, atenderam aos valores mínimos e máximos estipulados pela norma NBR5733/91.

No que se refere a resistência mecânica à compressão, o cimento utilizado apresentou um acréscimo de valores para os 3, 7 e 28 dias de 156%, 59,5% e 28,12%, sobre os limites mínimos especificados na NBR 5733/91, denotando a boa qualidade do aglomerante empregado no estudo.

### 3.2.3 Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento público local, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

### 3.2.4 Adição

Os materiais empregados como adição foram: a cinza de folha de bananeira proveniente de Guaraqueçaba-PR-Brasil; a cinza volante oriunda da queima do carvão mineral em termoeletrica, proveniente de Rio Grande do Sul e a sílica ativa proveniente do Pará.

### 3.2.5 Aditivo

Neste estudo foi empregado aditivo plastificante multifuncional líquido na coloração marrom do tipo Muraplast FK91, com base de lignossulfonatos, de pega normal que atua como dispersor de partículas de aglomerante e redutor da tensão superficial da água empregada na mistura. Com massa específica de  $1,18 \text{ g/cm}^3$  a dosagem do aditivo para cada argamassa variou conforme consistência de  $(255 \pm 10) \text{ mm}$  não ultrapassando 1,0% da massa do cimento.

## 3.3 PRODUÇÃO DA CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA

A produção da cinza de folha de bananeira foi baseada no método desenvolvido por KANNING (2010) onde o material foi incinerado não havendo interferência do meio externo. A temperatura de queima da folha de bananeira foi medida com o equipamento termopar do tipo K com leitor digital, que pode registrar temperaturas que variam de  $-50^\circ\text{C}$  até  $1000^\circ\text{C}$ .

A cinza proveniente da queima das folhas de bananeira foi moída em um moinho de bolas com capacidade de 35 litros, de marca MARCONI, velocidade de giro de 55 rpm e moagem do material pelo formato de catarata (CORDEIRO, 2006) e tempo pré-determinado de 30 minutos (KANNING, 2010).



Após a moagem, o material foi acondicionado em sacos plásticos para posterior verificação da sua atividade pozolânica conforme a norma NBR 5751/92.

### 3.3.1 Determinação da intensidade de cor dos materiais pozolânicos

O modelo utilizado para caracterizar a coloração das cinzas da Figura 3.3 foi o RGB, que tem como princípio a combinação das cores primárias: vermelho; verde e azul, também conhecidas no idioma inglês como: “Red (R); Green (G) e Blue (B)”.

A escala de cores advém da emissão de fótons de um determinado componente excitado por uma fonte emissora como é o caso do tubo de raios catódicos de uma tela de computador ou de uma televisão.

Como ocorre uma combinação das três cores (vermelho, verde e azul), em formato de um cubo com coordenadas X, Y e Z, outras cores podem ser representadas, possibilitando 256 valores para cada intensidade de cada tom, chegando desta forma à cerca de  $256^3$  ou 16.777.216 diferentes combinações.

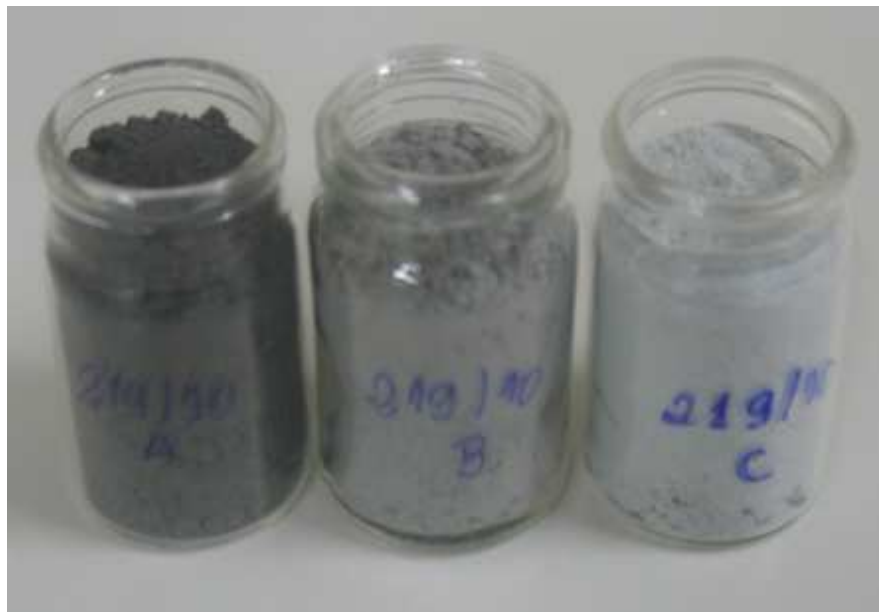


Figura 3.3 – Aspecto de cores das cinzas utilizadas  
219/10 A (CB) - 219/10 B (CV) - 219/10 C (Si)

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS

#### 3.4.1 Determinação do resíduo na peneira 45 µm

O ensaio foi efetuado tomando como base a pesagem de um grama de cada material em balança de precisão com três casas decimais, seguido de sua deposição em uma peneira de malha 45 µm (#325).

O peneiramento foi realizado com o lançamento de um jato de água por um período de um minuto com uma pressão de 0,75 kgf/cm<sup>2</sup> sobre a peneira situada a uma distância de 100 mm da torneira. A pressão foi controlada por um manômetro da marca SOLOTEST, como observado na Figura 3.4. Após o peneiramento via úmida o conjunto peneira contendo a pozolana foi seco em estufa a uma temperatura de 100 °C até não haver mais variação de massa, seguido então da determinação do resíduo na peneira 45 µm como, como mostra a Equação 3.1.

$$R = \left( \frac{mi}{mf} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde: R – resíduo na peneira 45 µm;

*mi* – massa inicial (g);

*mf* – massa final (g).

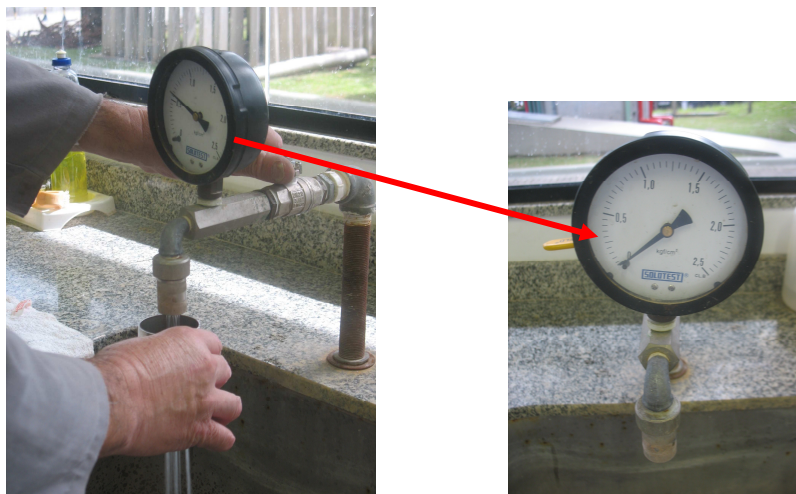


Figura 3.4 – Ensaio de peneiramento via úmida

### 3.4.2 Massa específica

A determinação das massas específicas da cinza de folha de bananeira, da cinza volante e da sílica ativa foi realizada no frasco de *Le Chatelier*, como visto na Figura 3.5, conforme recomendação da norma NBR NM 23/01.

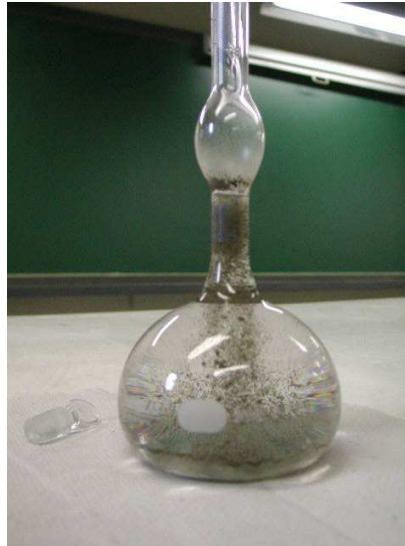


Figura 3.5 – Massa específica das pozolanas

O resultado da massa específica do material analisado foi obtido pela Equação 3.2.

$$Me = \frac{m}{v - v_0} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: Me – massa específica (g/cm<sup>3</sup>);

m – massa do material analisado (g);

v – volume do líquido (Xilol) + material (cm<sup>3</sup>);

v<sub>0</sub> – volume do líquido (cm<sup>3</sup>).

### 3.4.3 Método de permeabilidade ao ar – método de *Blaine*

A superfície específica da cinza foi determinada pelo método de *Blaine*, tendo como base a passagem de ar em uma camada compactada de material com dimensões e porosidade especificadas, como estabelecido na norma NBR NM

76/98. O aparelho digital de *Blaine* utilizado foi da marca ToniPERN, como mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Aparelho digital de permeabilidade ao ar de *Blaine*

#### 3.4.4 Difração e fluorescência de raios-X

A análise da cinza de folha de bananeira, da cinza volante e da sílica ativa foi feita por meio de difração e fluorescência de raios X. Seus resultados possibilitaram a identificação da natureza química e da fase dos minerais cristalinos presentes no material.

Os ensaios de difratometria foram realizados a partir de amostras quarteadas como mostrado na Figura 3.7 e, posteriormente, moídas em moinho de panela como apresentado na Figura 3.8, até a completa passagem na peneira de abertura de malha 75  $\mu\text{m}$ .



Figura 3.7 – Quarteador



Figura 3.8 – Moinho de panela com anéis

A massa preparada de cada amostra foi de 7 g de cinza e 1,4 g de aglomerante do tipo cera orgânica que teve como função aglomerar as partículas. Na Figura 3.9 está mostrada imagem da prensa no momento do preparo do material utilizado nos ensaios. As amostras foram prensadas mecanicamente em porta amostra de 50 mm de diâmetro a uma pressão de 5 t/cm<sup>2</sup> da máquina de marca Pfaff, como apresentado na Figura 3.9. O ensaio de difração de raios X foi executado no equipamento Difratorômetro X'Pert com Detector Celerator - PHILIPS, como mostrado na Figura 3.10. As medidas foram realizadas entre 2 $\theta$  de 3° a 70°, com passo angular de 0,02° e tempo de passo de 0,5 s. Para as análises empregou-se tubo com anodo de cobre 40 kV/30 mA, com fenda divergente de 1/2°.



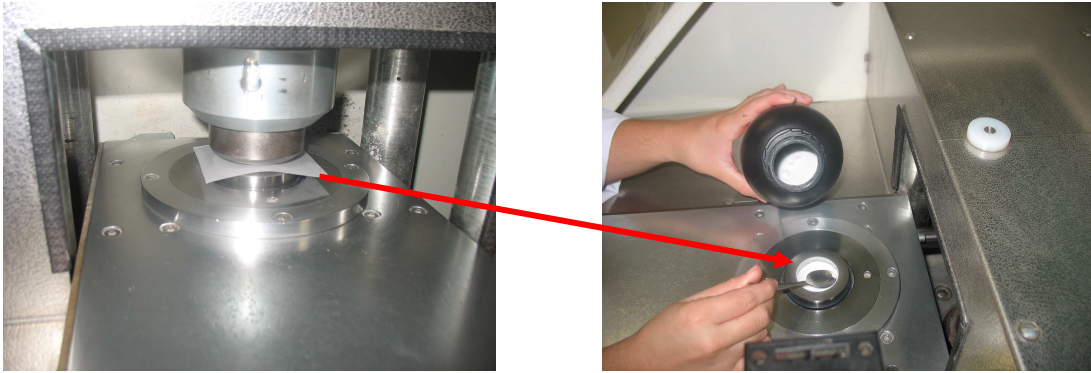


Figura 3.9 – Prensa para preparo da amostra

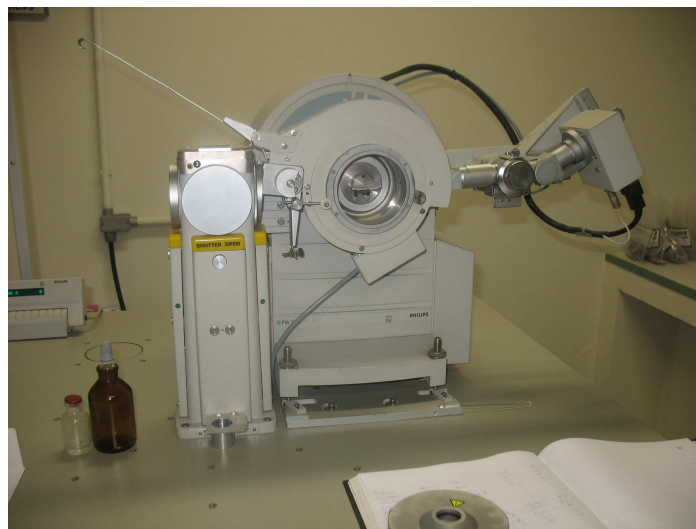


Figura 3.10 – Difratorômetro de raios X

A fluorescência de raios X foi realizada nas amostras liofilizadas e moídas até a completa passagem na peneira de abertura de malha 75  $\mu\text{m}$ .

A massa preparada de cada amostra foi de 4 g. As amostras foram prensadas manualmente em porta amostra de 27 mm de diâmetro.

Os resultados foram coletados pelo equipamento espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda sequencial Philips/PANALYTICAL modelo PW 2400 com fonte de raios X (tubo) de Rh de 3kW.

#### 3.4.5 Granulometria a laser

As análises granulométricas foram realizadas em equipamento marca CILAS, modelo 1064. Por se tratar de um material fino, cada amostra de 100 g foi analisada

por um período de 60 s, com vibração da bandeja de 80% e o ar de dispersão de 3,5 bar.

#### 3.4.6 Microscopia eletrônica de varredura das pozolanas

Para análise por microscopia eletrônica de varredura das pozolanas adotou-se a deposição das mesmas sobre uma fita de carbono seguido da metalização com ouro, procedimento efetuado com evaporação catódica à ultravácuo pelo equipamento Bal-Tec SCD 005. As imagens microscópicas foram obtidas pelo equipamento de marca Philips, modelo XL30 e a composição química elementar das regiões estudadas por intermédio de uma microsonda analítica, de marca Edax acoplada ao microscópio, para espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

#### 3.4.7 Índice de atividade pozolânica com a cal

O referido ensaio teve como base verificar o índice de atividade pozolânica (IAP), com cal, da cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa de acordo com a norma NBR 5751/92. Como requisitos químicos e físicos o hidróxido de cálcio deve apresentar os limites mostrados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Requisitos químicos e físicos do hidróxido de cálcio – NBR 5751/92

Requisitos químicos e físicos	Limites
Óxidos de cálcio e magnésio (não-voláteis), mínimo %	95
Óxido de magnésio (após calcinação), máximo %	5
Dióxido de carbono, máximo %	7
Material retido na peneira 600 µm (nº 30), máximo %	0,5
Material retido na peneira 75 µm (nº 200), máximo %	15

A pozolanicidade foi verificada a partir de uma argamassa de referência no traço em massa de 104:936 g (hidróxido de cálcio: areia) e a consistência de  $(225 \pm 5)$  mm verificada pelo ensaio de mesa de consistência ("Flow Table").

A argamassa de referência foi acrescida de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa, atendendo à Equação 3.3:

$$IAP = 2x(\delta_{\text{poz}} \times \delta_{\text{cal}}) \times 104 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde: IAP – índice de atividade pozolânica com a cal;  $\delta_{\text{poz}}$  – massa específica da pozolana ( $\text{kg/m}^3$ ); e,  $\delta_{\text{cal}}$  – massa específica da cal hidratada ( $\text{kg/m}^3$ ).

A mistura do hidróxido de cálcio com a pozolana foi feita em recipiente fechado por um período de, aproximadamente, 2 minutos, seguido da colocação sobre a água na cuba do misturador mecânico e posterior adição da areia.

O tempo de mistura foi baseado na norma NBR 7215/96. O índice de consistência foi obtido pelo ensaio “Flow Table”, cujo equipamento está mostrado na Figura 3.11, a partir do preenchimento de um molde tronco cônico em três camadas com a aplicação de 15, 10 e 5 golpes sucessivamente com o auxílio de um soquete metálico. Após, efetuou-se o movimento do prato da mesa de consistência em 30 quedas, uma a cada segundo.



Figura 3.11 – Consistência da argamassa – “Flow Table”

A cura foi realizada em ambiente climatizado nas primeiras horas ( $24 \pm 2$ ) h à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  seguidos de  $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$  até antes do ensaio de rompimento.

O índice de atividade pozolânica com a cal foi determinada com idade de 7 dias, utilizando 6 corpos de prova de  $(5 \times 10)$  cm, capeados com enxofre em



conformidade com a norma NBR 5751/92. Para os ensaios foi utilizada a prensa Toni Technik / ToniNORM, como mostrada a Figura 3.12, com velocidade de carregamento de 500 N/s.



Figura 3.12 – Resistência à compressão das argamassas para IAP

#### 3.4.8 Ensaio de Chapelle Modificado

O ensaio de Chapelle teve como premissa medir as quantidades de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa, que reagem em meio aquoso com óxido de cálcio (CaO). Para tal, realizou-se a mistura de 1 grama de CaO puro com 1 grama de cada material em 250 ml de água. Colocadas em Erlenmeyers e posteriormente submetidas a um banho-maria na temperatura de 90 °C, as amostras permaneceram em agitação mecânica por um período de 16±2 horas. Após resfriamento das soluções em temperatura ambiente, as mesmas receberam adição de sacarose, seguidas de agitação. Durante a filtragem da solução realizou-se o acréscimo de indicador de pH (fenolftaleína) seguido da sua titulação de HCl 0,1 mol/L. A atividade pozzolânica pelo método de Chapelle Modificado foi obtida pela Equação 3.4.

$$mgCaO / gdematerial = \left[ 28x(V3.m3 - V2.m4) / m4.m3.m2 \right] Fc \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde: V3 – volume de HCl 0,1 mol/L consumido no ensaio em branco; V2 – volume de HCl 0,1 mol/L consumido no ensaio com amostra em ml; m2 – massa de cada material a ser analisado (g); m4 – massa de CaO empregado no ensaio em branco; m3 – massa de CaO empregado no ensaio com as amostras (g); e, Fc – fator de correção do HCl em concentração de 0,1 mol/L.

O resultado obtido pela Equação 3.4 é descrito em miligramas de óxido de cálcio (mg de CaO) consumido para cada grama de pozolana estudada, sendo considerado como material cimentante um valor limite de 330 mg de CaO conforme estabelecido por Raverdy et al. (1980).

### 3.5 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

O traço 1:3 em massa empregado para a argamassa de referência tomou como base os trabalhos desenvolvidos por RODRIGUES *et al.* (2010); MENEZES *et al.* (2009); MOHAMAD *et al.* (2009); CERÍACO CRUZ (2008); LIMA *et al.* (2008); PEREIRA *et al.* (2008); RODRIGUES (2008); SILVA (2006); CAVACO (2005); AMORIM *et al.* (1999); CARNEIRO *et al.* (1999); KILINÇKALE (1997) e SABBATINI (1984).

As porcentagens de adição estiveram fundamentadas nos trabalhos desenvolvidos por CARMO (2006); BAUER *et al.* (2004); ACI 363R – 92 (2001); MENDES (2002) com o emprego de sílica ativa, BARATA (2002) cinza volante, WEBER (2001) e GOMES (2003) cinza de casca de arroz, PAULA (2006) e PAULA (2009) bagaço de cana-de-açúcar, MENEZES *et al.* (2009) e CARMO (2006) caulim, VOGT, *et al.* (2006) sílica de fumo e LIMA *et al.* (2008) castanha de caju, adotou-se desta forma as proporções de adição em massa para cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa em 5,0%; 7,5% e 10%.

Conforme consultado na literatura, outros materiais poderiam ser acrescidos em valores superiores a 10%, porém, para a sílica ativa, não ocorria o mesmo, haja vista que em proporções inferiores a 5% não se obtém todos os ganhos na resistência bem como superiores a 10% não acresceriam valores na resistência mecânica dos compósitos (NEVILLE, 1997; MENDES, 2002, MALHOTRA e MEHTA, 1996; AITCIN, 2000; DAL MOLIN, 1995; CARETTE e MALHOTRA, 1993; LOPES, 1998).

Neste trabalho, optou-se pela não utilização do aglomerante cal comumente empregado em argamassas de revestimento uma vez que este aglomerante apresenta na sua composição o  $\text{CaO}$ , que em contato com as adições de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa reagiriam quimicamente formando estruturas de CSH. A não utilização da cal como aglomerante propiciou verificar o comportamento reológico das argamassas e sua reação química com o  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado durante as reações químicas do cimento. Verifica-se na Tabela 3.1 a quantidade em massa dos materiais empregados nas argamassas.

Tabela 3.1 – Quantidade de materiais empregado nas argamassas

Argamassa	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Areia (g)	Aditivo (g)
Referência	800	0,0	500	2400	0,0
5% CB	800	40	500	2400	5,0
7,5% CB	800	60	500	2400	5,0
10% CB	800	80	500	2400	6,0
5% CV	800	40	500	2400	5,0
7,5% CV	800	60	500	2400	6,0
10% CV	800	80	500	2400	7,0
5% Si	800	40	500	2400	5,0
7,5% Si	800	60	500	2400	5,0
10% Si	800	80	500	2400	5,0

### 3.5.1 Determinação do tamanho da amostra

O tamanho da amostra foi calculado tomando como base a Equação 3.4 (DAL MOLIN *et al.*, 2005) apresentada na seqüência. Realizou-se, inicialmente, a moldagem de 6 corpos de prova no traço 1:3 em massa, os quais foram ensaiados aos 7 dias, tendo como base a verificação da normalidade da distribuição dos dados. Embora, o número de corpos de prova calculado estatisticamente tenha sido dois, optou-se por moldar seis de maneira a fornecer maior confiabilidade aos resultados obtidos para os ensaios, totalizando 150 unidades para as 10 amostras, ensaiadas aos 28, 56 e 91 dias de idade.

$$n = z_{\alpha/2}^2 X \left( \frac{CV^2}{Er^2} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:  $n$  = número de repetições;

$Er$  = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

$CV$  = coeficiente de variação da amostra calculado em 6%;

$Z_{\alpha/2}$  = o valor tabelado para  $\alpha = 5\%$  de significância apresenta valor de 1,96.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTADO FRESCO

#### 3.6.1 Ensaio de consistência – “Flow Table”

O preparo da argamassa atendeu aos quesitos da norma NBR 13276/05, onde foi preparada uma argamassa de cimento no traço 1:3 em massa, utilizando para tal uma argamassadeira mecânica com cuba em aço inox e capacidade de 5 ℓ e velocidades de rotação de  $(140 \pm 5)$  rpm (baixa) e de  $(285 \pm 5)$  rpm (alta). A argamassa foi preparada tendo-se, como base, a sequência pó na água conforme analisado a norma NBR13276/05 e o trabalho de Antunes (2005) e a obtenção da consistência padrão definida em  $(255 \pm 10)$  mm, conforme segue:

- colocação de toda a água no interior da cuba;
- despejo dos materiais secos (previamente misturados em saco plástico por um minuto) na cuba por um período de 30 s;
- homogeneização por 90 s em velocidade baixa;
- descanso e possível destorroamento da argamassa em 60 s; e
- homogeneização final por 90 s em velocidade baixa.

#### 3.6.2 Teste de consistência por “squeeze-flow”

O presente trabalho teve como base o arranjo do teste apresentado na Figura 3.13. Nesta arquitetura, a área sob carregamento permaneceu constante, mas a área submetida aos fenômenos de escorregamento e atrito entre a base e a amostra foi variável.

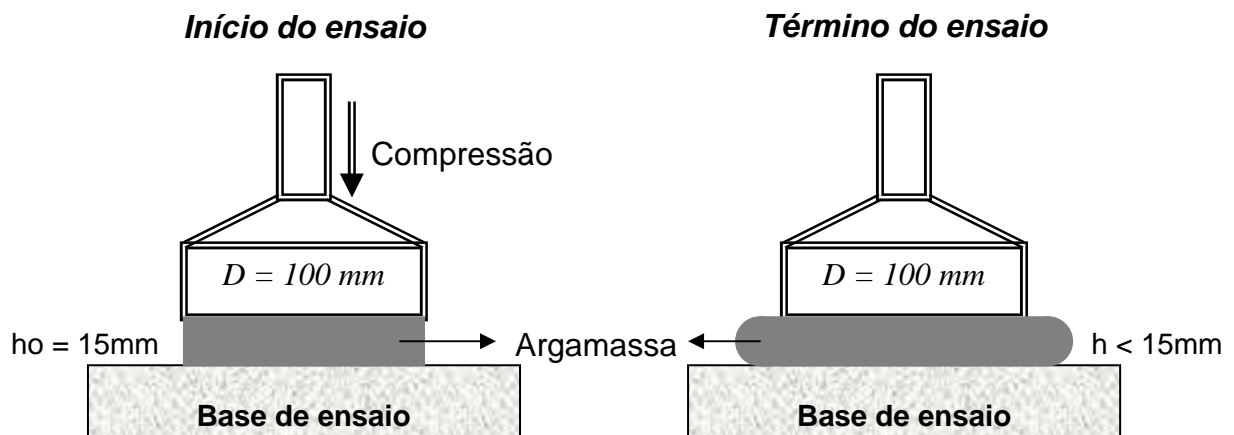


Figura 3.13 – Arranjo de ensaio de consistência por “Squeeze-flow”.

Os resultados obtidos pelas curvas de correlação entre carga *versus* deslocamento e carga *versus* tempo possibilitaram verificar as solicitações práticas das argamassas no estado fresco (CARDOSO *et al.*, 2005 e COSTA, 2006).

### 3.6.3 Determinação da retenção de água

A análise da retenção de água foi baseada na norma NBR 13277/05, a qual prescreve a utilização do funil de *Büchner* com bomba de vácuo para a referida avaliação.

De acordo com a norma ABNT NBR 13277/05, deve-se utilizar funil de *Buchner* com bomba de vácuo, conforme mostrado na Figura 3.14, para se fazer a análise. O ensaio consistiu em colocar a argamassa sobre um papel filtro umedecido previamente, sendo adensada com 16 golpes próximos a borda e 21 golpes no centro. Completados 37 golpes fez-se o arrasamento seguido de uma sucção com uma pressão de 50 mmHg por um período de 15 minutos.



Figura 3.14 - Conjunto funil de Buchner e bomba de vácuo

Os resultados foram obtidos pela Equações 3.5 e 3.6, listadas a seguir:

$$Ra = (1 - (ma - ms) / AF(ma - mv)) \times 100 \quad \text{Equação 3.5}$$

$$AF = mw / (m + mw) \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:  $ma$  = massa do conjunto com argamassa (g);

$ms$  = massa do conjunto após sucção (g);

$mv$  = massa do conjunto vazio (g);

$mw$  = massa total da água da mistura (g);

$m$  = soma das massas dos materiais secos da argamassa (g).

A norma NBR 13281/05, estabelece os valores limites listados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Valores de retenção de água conforme NBR 13281/05

Classe	Retenção de água (%)	Método de Ensaio
U1	≤78	NBR 13277/05
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

### 3.6.4 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

A massa específica foi determinada, conforme a norma NBR 13278/05. O referido ensaio possibilitou determinar o teor de ar incorporado a partir da massa específica da argamassa avaliada. No ensaio, foi prevista a colocação da argamassa em 3 camadas em um recipiente com um volume de, aproximadamente, 400 cm<sup>3</sup>. A argamassa foi adensada por meio de uma espátula com 20 golpes cada, seguida de 3 quedas do recipiente a uma altura de 3 cm.

A massa específica foi determinada pela Equação 3.7:

$$Me = \left( \frac{mc - mv}{vr} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3.7}$$

onde: mc é a massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa do ensaio (g);

mv, é massa do recipiente cilíndrico vazio (g); e

vr é o volume do recipiente cilíndrico, em cm<sup>3</sup>.

A norma NBR 13281/05, estabelece os valores listados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Massa específica das argamassas no estado fresco conforme NBR13281/05

Classe	Massa específica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Método de Ensaio
D1	≤1400	NBR 13278/05
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	>2000	

O teor de ar incorporado foi realizado de acordo com a norma NBR 13278/05, pela Equação 3.8:

$$At = 100 \times \left( 1 - \frac{d}{dt} \right) \quad \text{Equação 3.8}$$

onde: At é o teor de ar incorporado em %.

d é a massa específica da argamassa (g/cm<sup>3</sup>);

dt é a massa específica da argamassa sem vazios (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.7 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

#### 3.7.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas foi determinada com idade de 28, 56 e 91 dias, utilizando 6 corpos de prova para cada traço em conformidade com a norma NBR 13279/05. Após o preparo das argamassas foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de (40 x 40 x 160)mm, confeccionados em 2 camadas de mesma altura, adensadas com 30 quedas cada uma, geradas por uma mesa de adensamento. A cura inicial dos corpos-de-prova se deu por um período de 24 horas, com a permanência das argamassas no interior dos moldes, protegidos por filme plástico. Desmoldados, os corpos-de-prova foram acondicionamento em tanque de imersão, onde permaneceram até as datas dos ensaios.

Os ensaios foram efetuados em uma prensa universal de ensaios EMIC DL30000 com velocidade de carregamento de 500 N/s, como visto na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão de argamassas



A resistência à compressão foi obtida pela Equação 3.9:

$$R_c = \left( \frac{f_c}{1600} \right) \quad \text{Equação 3.9}$$

onde:  $R_c$  é a resistência à compressão (MPa);

$F_c$  é a carga máxima aplicada (N);

1600 é a área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>)

A norma NBR 13281/05 estabelece os valores de resistência à compressão das argamassas listados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resistência à compressão de argamassas, conforme NBR13281/05

<b>Classe</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Método de Ensaio</b>
P1	≤ 2	NBR 13279/05
P2	1,50 a 3,0	
P3	2,50 a 4,50	
P4	4,0 a 6,50	
P5	5,50 a 9,0	
P6	> 8,0	

### 3.7.2 Resistência à tração na flexão

Foram utilizados 6 corpos de prova com dimensões (40 x 40 x 160) mm na idade de 28, 56 e 91 dias conforme estabelecido na norma NBR 13279/05, rompidos na máquina universal de testes EMIC DL30000, com velocidade de carregamento de 50 N/s.

No teste, foi realizado um carregamento na parte central do corpo de prova, bi-apoiado sobre suportes de aço em forma de roletes distantes entre si de (100 ± 0,5) mm para reduzir as tensões de tração, como mostrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Teste de resistência à tração das argamassas

Os resultados da resistência mecânica à tração foram obtidos pela Equação 3.10:

$$R_t = \left( \frac{1,5 \times F_t \times L}{40^3} \right) \quad \text{Equação 3.10}$$

onde:  $R_t$  é a resistência à tração na flexão, em MPa;

$F_t$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

$L$  é a distância entre os suportes, em mm.

A norma NBR 13281/05 estabelece os valores para a resistência à tração na flexão, conforme a Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Resistência à tração na flexão, conforme NBR 13281/05

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Método de Teste
R1	$\leq 1,50$	NBR 13279/05
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,50 a 2,70	
R4	2,0 a 3,50	
R5	2,70 a 4,50	
R6	$> 3,50$	

### 3.7.3 Massa específica no estado endurecido

O teste de massa específica no estado endurecido foi efetuado em corpos de prova prismáticos com idade 28 dias, conforme recomendado pela norma NBR 13280/05.

Para a obtenção dos resultados, realizou-se a determinação do volume coletando as dimensões dos corpos de prova, utilizando para tal um paquímetro. Para a determinação da massa dos corpos de prova utilizou-se uma balança com precisão de duas casas, e os resultados foram aplicados na Equação 3.11:

$$\rho_{m\acute{a}x} = \left( \frac{m}{v} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3.11}$$

onde:  $\rho_{m\acute{a}x}$  é a densidade de massa no estado endurecido em kg/m<sup>3</sup>;  
 m é a massa do corpo de prova em gramas;  
 v é o volume do corpo de prova em cm<sup>3</sup>.

A norma NBR 13280/05 conforme a Quadro 3.7, estabelece os seguintes valores para a massa específica no estado endurecido.

Quadro 3.7 – Massa específica no estado endurecido, conforme NBR 13280/05

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (Kg/m <sup>3</sup> )	Método de Teste
M1	≤1200	NBR 13280/05
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	>1800	

### 3.7.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada com corpos de prova prismáticos de dimensões (40 x 40 x 160) mm, aos 28 dias de idade, de acordo com

a norma NBR 15259/05. Os corpos de prova permaneceram inseridos em uma película de água de 5 mm como mostrado na Figura 3.17. O nível de água foi mantido injetando água constantemente no interior do recipiente, sem que ocorresse a sua variação.



Figura 3.17 - Equipamento de teste da absorção de água por capilaridade

Nos períodos de 0, 10 e 90 minutos os corpos de prova foram pesados e seus resultados de absorção de água por efeito capilar obtido pela Equação 3.12:

$$At = \frac{(mt - mo)}{16} \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:  $At$  é a absorção de água por capilaridade em  $\text{g/cm}^2$ ;

$mt$  é a massa do corpo de prova em cada tempo em gramas;

$mo$  é a massa inicial do corpo de prova em gramas;

16 área de contato com a película de água, em  $\text{cm}^2$ .

O coeficiente de capilaridade, conforme a Quadro 3.8, é o coeficiente angular da reta, tomando-se no eixo das abscissas a raiz quadrada dos tempos de 10 minutos e 90 minutos e no eixo das ordenadas as absorções de água correspondentes há estes tempos.

O resultado de cada amostra foi obtido pela Equação 3.13:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad \text{Equação 3.13}$$

onde: C é o coeficiente de capilaridade ( $\text{g/dm}^2/\text{min}^{1/2}$ );

$m_{90}$ , é a massa do corpo de prova em contato com a água por 90 min;

$m_{10}$ , é a massa do corpo de prova em contato com a água por 10 min.

Quadro 3.8 – Coeficiente de capilaridade conforme a norma NBR 15259/05

Classe	Coeficiente de capilaridade ( $\text{g/dm}^2/\text{min}^{1/2}$ )	Método de Teste
C1	$\leq 1,50$	NBR 15259/05
C2	1,0 a 2,50	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	$> 10,0$	

### 3.7.5 Microscopia eletrônica de varredura com microsonda analítica de Raios X

Os corpos de prova para análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e (EDS), foram obtidos após os testes de resistência a compressão das argamassas aos 56 dias.

Empregou-se este tipo de amostra com intuito de se verificar microscopicamente o comportamento das adições de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa, comparativamente a uma argamassa de referência sem adição de material pozzolânico.

Para uma melhor qualidade de imagens, as amostras receberam na sua superfície uma metalização em ouro, realizada por evaporação catódica a vácuo em equipamento TEC SCD 005.

O equipamento utilizado para analisar as argamassas por meio de MEV foi da marca Philips, modelo XL30, com microsonda analítica para espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), marca Edax.

### 3.7.6 Resistência de aderência superficial

As argamassas com os diferentes teores de adição de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa no traço 1:3 em massa foram submetidas ao teste de resistência de aderência, nas idades de 28; 56 e 91 dias. Para tal, as argamassas foram aplicadas em uma parede de alvenaria de blocos cerâmicos (9 x 14 x 19) cm, como mostrado na Figura 3.18.

A escolha por blocos cerâmicos foi devido a estes serem os mais consumidos no Brasil, chegando a uma produção mensal de 4.000.000.000 blocos em 2011 (ANICER, 2011). Em cada revestimento realizaram-se dez arrancamentos para as idades de 28; 56 e 91 dias, utilizando para tal pastilhas metálicas com diâmetro de médio de 50 mm.

A superfície da alvenaria foi revestida inicialmente com chapisco rolado. Após a cura de 7 dias do chapisco, as argamassas de referência e com adição de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa foram aplicadas na parede com uma espessura 1,5 cm, as quais receberam acabamento com desempenadeira de madeira.

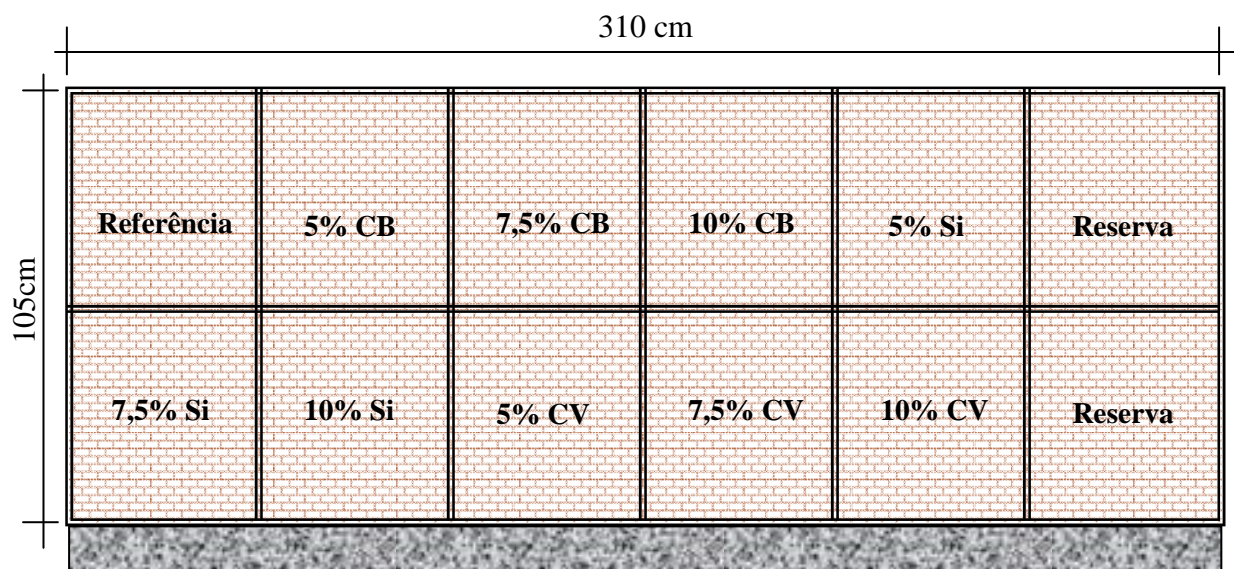


Figura 3.20 – Arranjo de teste de arrancamento de argamassas

Depois da cura aos 28 e 56 e 91 dias, as argamassas preparadas conforme a norma NBR 13276/05, totalizando 30 corpos de prova para cada traço, foram preparadas por meio de uma serra copo com diâmetro interno de 50 mm. As

mesmas foram cortadas até atingir uma profundidade de 1 mm no substrato, tendo como base a recomendação da norma NBR 13528/95.

O arrancamento das argamassas teve como parâmetro a considerar a marcação inicial dos locais a serem perfurados tomando como base a Figura 3.19. A determinação dos pontos de arrancamento procedeu-se com base na tabela de números aleatórios gerado por MARTINS (2011), apresentado no Anexo 1.

A aleatoriedade foi efetuada iniciando-se na primeira linha da tabela seguindo-se para a segunda e assim sucessivamente até o término da numeração dos corpos de prova.

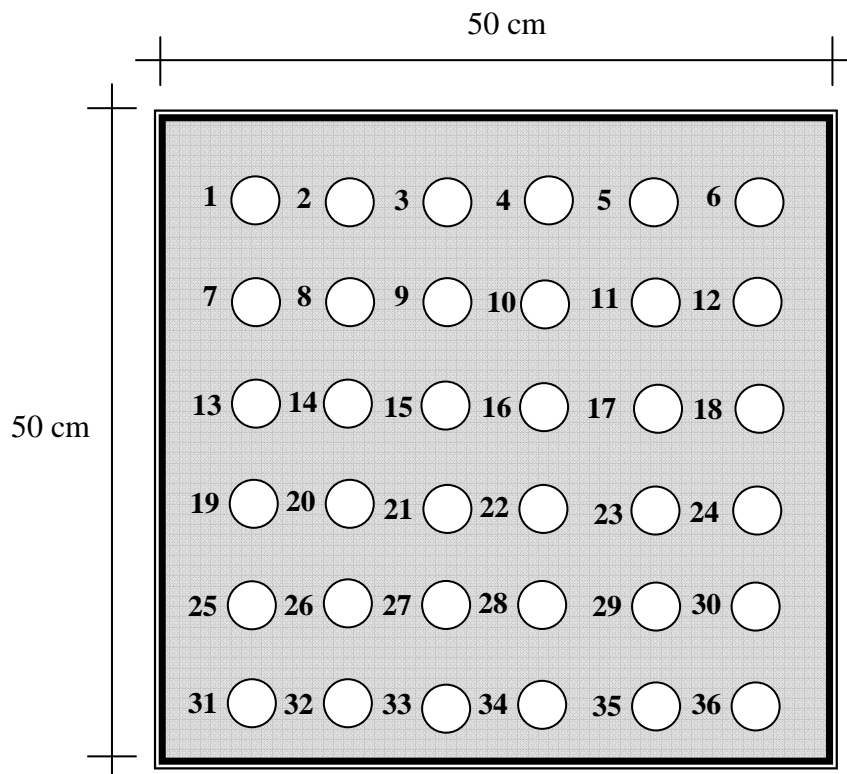


Figura 3.21 – Pontos pré-determinados para o teste de arrancamento

A seqüência de extração seguiu a seguinte ordem para os 28 dias: 21; 13; 08; 29; 28; 09; 27; 06; 32 e 02.

A extração aos 56 dias se baseou na seqüência: 16; 17; 18; 30; 35; 25; 03; 12; 19 e 07. Para 91 dias: 15; 11; 22; 01; 31; 24; 10; 04; 20 e 05. Notou-se a existência de seis locais extras intitulados com os números 23; 36; 14; 33; 26 e 34 para uma possível extração devido a problemas de perfuração para posterior colocação das pastilhas.

Na Figura 3.20 estão demonstrados os locais para cada data de arrancamento.

Onde: ● extração dos corpos de prova aos 28 dias de idade;

● extração dos corpos de prova aos 56 dias de idade;

● extração dos corpos de prova aos 91 dias de idade;

● corpos de prova extras.

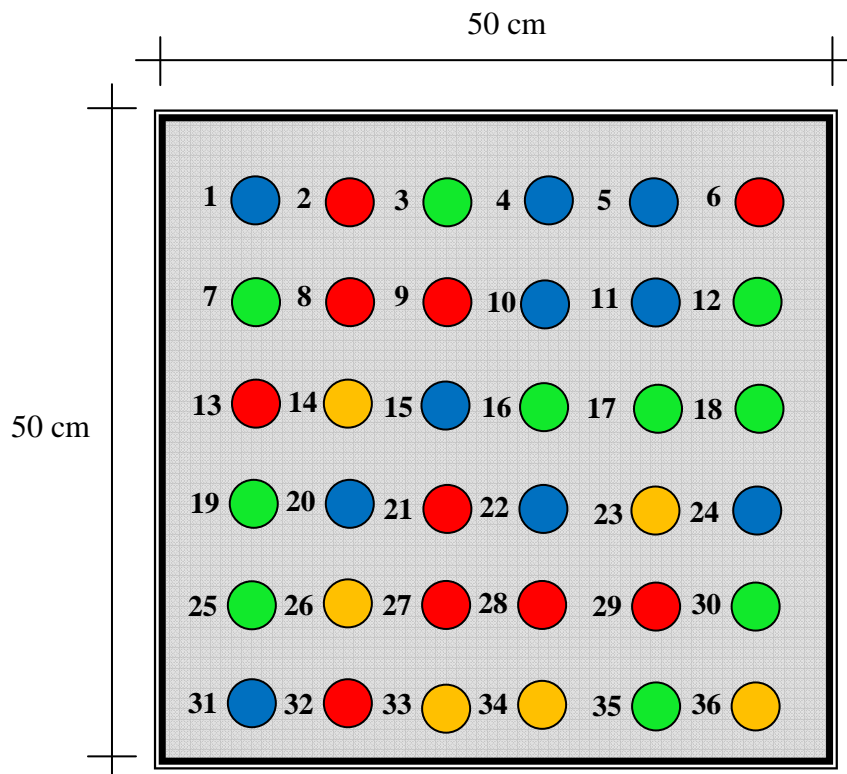


Figura 3.20 – Pontos de arrancamento para cada idade

Os resultados da resistência potencial de aderência à tração das argamassas foram obtidos pela Equação 3.15 e a forma de ruptura foi analisada com base nas Figuras 3.21; 3.22; 3.23; 3.24 e 3.25.

$$R_i = \frac{P_i}{A_i}$$

Equação 3.15



onde:  $R_i$  = resistência potencial de aderência à tração (MPa);  
 $P_i$  = carga de ruptura (N);  
 $A_i$  = área do corpo de prova ( $\text{mm}^2$ ).

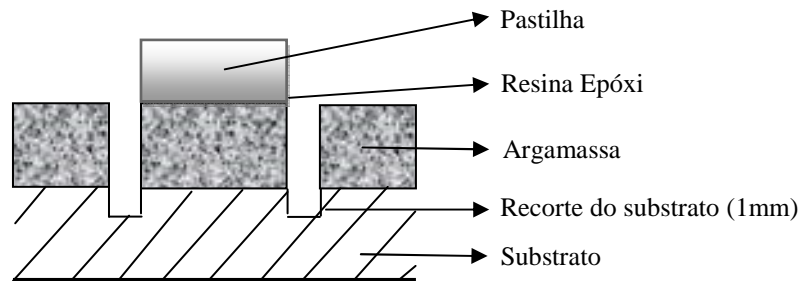


Figura 3.21 – Arranjo de teste de arrancamento de argamassa

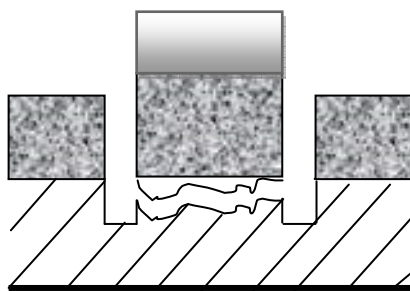


Figura 3.22 – Ruptura no substrato (S)

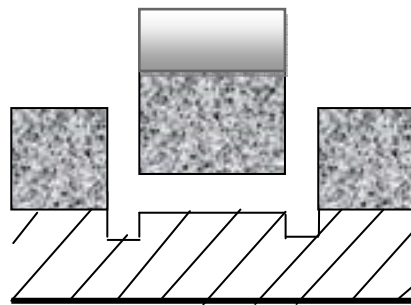


Figura 3.23 – Ruptura Substrato/argamassa (S/A)

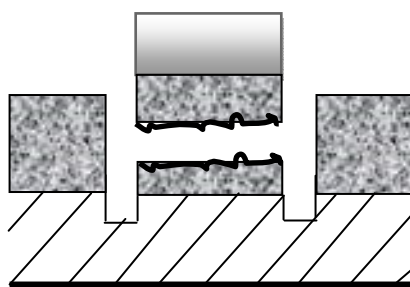


Figura 3.24 – Ruptura na argamassa (A)

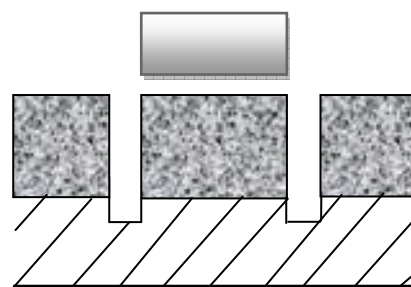


Figura 3.25 – Ruptura na colagem da pastilha (P)

### 3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA) e Teste-t, através do *software Microsoft Office Excel 2007*.

Determinadas as variâncias para os ensaios, verificou-se a existência ou não de diferenças significativas entre as amostras analisadas.

Os modelos estatísticos utilizados para previsão dos valores de uma determinada variável dependente, tomando como base valores de pelo menos uma ou mais variáveis explicativas, utilizaram-se técnicas de regressão simples determinadas pelo *software Microsoft Office Excel 2007*. Para a apresentação gráfica das regressões simples (2D) utilizou-se nesta pesquisa o mesmo *software*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados do programa experimental, analisados em função dos materiais empregados e dos parâmetros de qualidade mediante o embasamento nas normas brasileiras.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

O agregado miúdo natural foi classificado como uma areia média conforme estabelecido pela norma NBR 7211/05 e suas características físicas apresentam-se na Tabela 4.1. A caracterização do agregado miúdo mostrou se tratar de uma areia do tipo Quartzosa, de granulometria média, com Dimensão Máxima Característica de 4,8mm, sem a presença de substâncias deletérias acima dos limites impostos pela norma NBR7211/05. Os resultados comprovam a qualidade e a viabilidade de utilização deste material com agregados em argamassas.

Tabela 4.1 – Classificação do agregado natural

Ensaio	Norma	Resultados
Massa Específica (kg / m <sup>3</sup> )	NBR 9776/ 87	2640
Massa Unitária (kg / m <sup>3</sup> )	NBR 7810/ 83	1530
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR 7217/ 87	4,8
Módulo de Finura	NBR 7217/ 87	2,56
Teor de Material Pulverulento (%)	NBR 7219/ 87	4,20
Teor de Argila em Torrões (%)	NBR 7218/ 82	0,00
Teor de Matéria Orgânica (ppm)	NBR 7220/ 87	> 300,00
Absorção de Água (%)	NBR 9777/ 87	2,6%
Coeficiente de Inchamento Médio	NBR 6467/ 87	1,35
Teor de Umidade Crítica (%)	NBR 6467/ 87	4,30

A composição granulométrica do agregado miúdo natural está apresentada na forma gráfica na Figura 4.1.

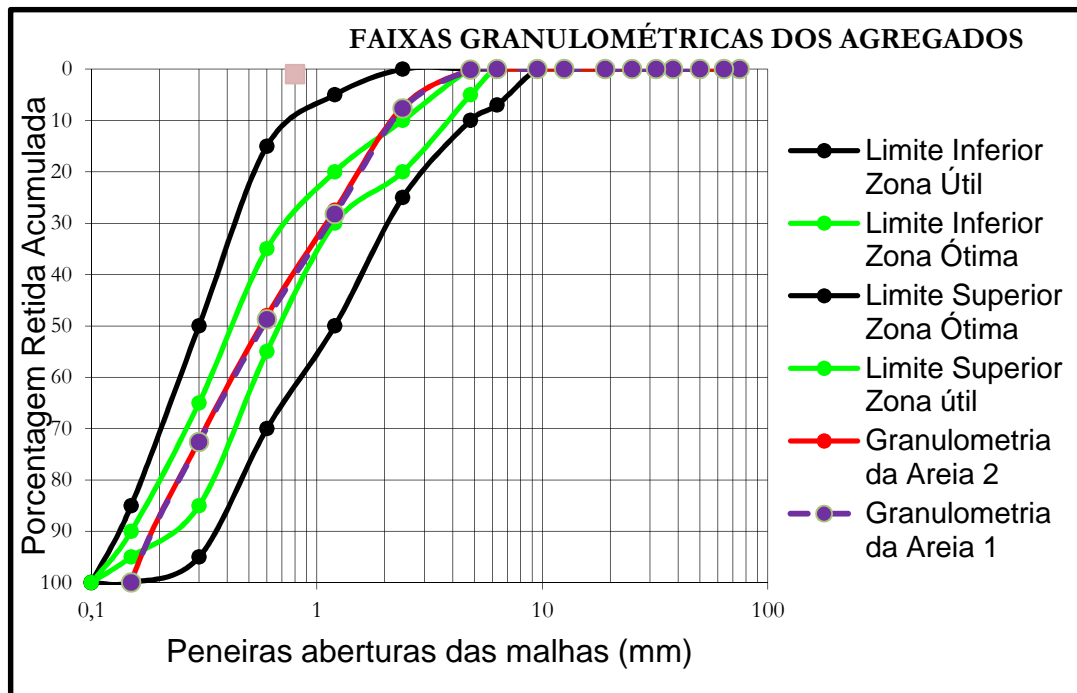


Figura 4.1 – Análise granulométrica da areia

Os resultados das duas amostras demonstram que estes se encontram dentro dos padrões estabelecidos pela norma NBR 7211/05. Avaliando-se a curva da Figura 4.1, verificou-se que a distribuição granulométrica é contínua, não mostrando picos acumulativos de material entre as peneiras, estando esta situada em sua grande maioria entre a zona ótima e a zona útil. Adotou-se a hipótese de variâncias equivalentes para as duas amostras da areia analisada. Para tal, aplicou-se a análise estatística Teste-t e os seus resultados demonstram que não existiram diferenças estatisticamente significativas, concluindo-se desta forma, que os resultados das análises granulométricas para as duas amostras da areia foram iguais estatisticamente ao grau de significância de 95%.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DA CINZA DE FOLHA DE BANANEIRA

A queima da folha de bananeira baseado no método desenvolvido por KANNING (2010) gerou como produto final a cinza de folha de bananeira. Por serem materiais orgânicos, as folhas de bananeira podem ser comparadas com as cascas de arroz que durante a sua queima chegaram a temperaturas médias de 850° C. A queima das folhas de bananeira demonstrou ter potencial de ser uma nova opção de

combustível para geração de energia em fornos ou caldeiras, tanto para geração de energia elétrica como para a industrialização da banana nos formatos banana seca ou bala de banana.

Correlacionando os dados apresentados por KANNING (2010) para a cinza de folha de bananeira, SILVA e TORRES FILHO (1997) e SENA (2011) para o cultivo de pés de banana, pode-se concluir que o Brasil apresenta um potencial de geração anual de 11,45 milhões de toneladas de folha de bananeira, o que equivale a 1,21 milhões de toneladas de cinza. Por ser um material orgânico como a casca de arroz, durante a sua queima são liberados gases de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, seguidos da sua absorção pelas plantas durante a fotossíntese, mantendo assim suas concentrações constantes na atmosfera o que também foi encontrado por FOLETTO (2005).

Embora a queima da casca de arroz libere gases de  $\text{CO}_2$ , a compostagem de materiais orgânicos, como é o caso da folha de bananeira, também apresenta liberação de gás carbônico, água e biomoléculas que constituem os novos organismos, o que também foi constatado por NELO *et al.* (2012). Verifica-se desta forma que a queima da folha de bananeira por ser um material orgânico se comporta como a casca de arroz, não apresentando malefícios ao meio ambiente durante a sua queima.

#### 4.2.1 Determinação da intensidade de cor dos materiais pozolânicos

Para a determinação da intensidade de cor das cinzas, empregou-se a escala de RGB que varia de 0 à 255, encontrado no programa de computador Microsoft Word. O cubo formado por cada cor encontra-se apresentado nas Figuras 4.2.

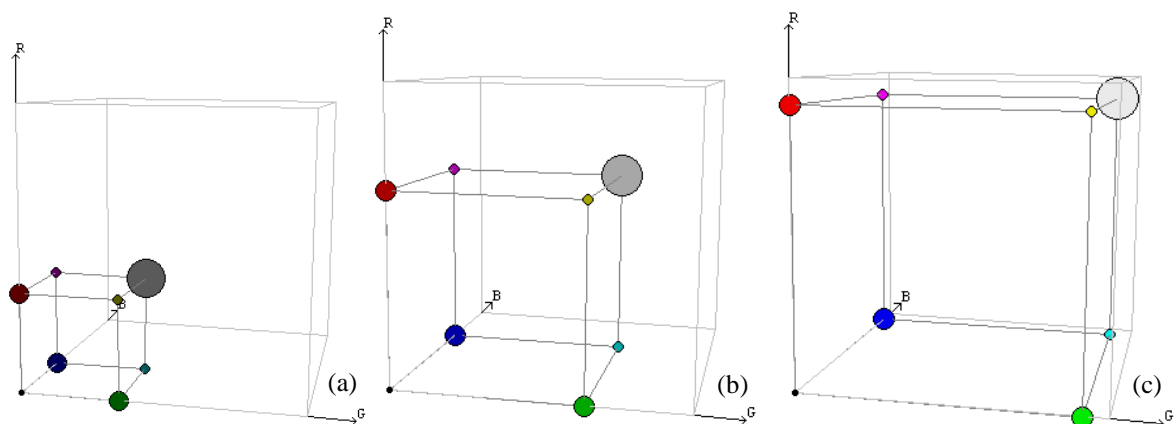


Figura 4.2 – Representação das cores no cubo gerado pela escala de RGB – Cinza de folha de bananeira (a); Cinza volante (b) e Sílica ativa (c)

O resultado da análise de cores das cinzas da Figura 3.3, encontra-se listado na Tabela 4.2.

Nota-se na Tabela 4.2 que a classificação de cores das cinzas aumentou de valor à medida que as cores foram ficando mais claras como é o caso da sílica ativa. As variações na coloração das pozolanas estão diretamente relacionadas com as quantidades de materiais não totalmente calcinados intitulados no ensaio de fluorescência de raios X como perda ao fogo, e pelo teor de óxido de ferro presente nas amostras, haja vista que o  $\text{SiO}_2$  se apresenta de forma incolor. Malhotra *et al.* (1987) e ACI 234R-96 (2001) verificaram em seus estudos que a coloração da sílica ativa pode ir do branco até o cinza escuro, e em alguns casos até o marrom, o que corresponde aos resultados encontrados. Isto representa que a cor está se aproximando da intensidade máxima que é a cor branca (RGB 255, 255, 255), tendo como influência a mudança de tonalidade das argamassas e de sua estética quando aplicadas de forma aparente na construção civil. Notou-se nos trabalhos analisados a falta de parâmetros para se determinar a intensidade das cores ficando desta forma muito abrangente apontar que uma variação de cor pode ir do branco até o cinza escuro ou marrom.

Tabela 4.2 – Classificação de cores das cinzas pelo método RGB

Material	Identificação	Cor			Classificação final
		Vermelho	Verde	Azul	
Cinza de folha de bananeira	219/10 A	90	90	90	Cinza RBG (90, 90, 90)
Cinza volante	219/10 B	167	167	167	Cinza RBG (167, 167, 167)
Sílica ativa	219/10 C	234	234	234	Cinza RBG (234, 234, 234)

#### 4.2.2 Granulometria a laser

O diâmetro médio das partículas, medido no granulômetro a laser (CILAS 1064) de cada material, encontra-se apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Diâmetro médio das partículas das pozolanas trabalhadas

Material	Quantidade de material analisado (g)	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )
Cinza de folha de bananeira	100	14,66
Cinza volante	100	29,33
Sílica ativa	100	21,84

A composição granulométrica das pozolanas está descrita na Tabela 4.4 e seus valores apresentados na forma gráfica na Figura 4.3.

Tabela 4.4 – Análise granulométrica das pozolanas

Abertura das peneiras ( $\mu\text{m}$ )	Porcentagem retido acumulado (%)		
	Folha de bananeira	Cinza volante	Sílica
42,5	0	0	0
35,5	0	0	0
28,0	0	0	0
18,0	0	0	0
15,0	0	0	0
9,0	0	0,49	0
7,5	0	2,67	0,33
6,3	0	7,36	1,47
5,3	0,11	14,89	3,86
4,3	1,60	26,18	8,89
3,6	4,97	35,39	15,53
2,8	12,71	47,29	29,32
2,0	27,39	60,45	50,3
1,0	59,96	77,89	74,79
0,6	73,95	85,12	86,13
0,3	86,47	91,14	94,79
0,1	96,07	95,86	97,03
Fundo	100,00	100,0	100,0

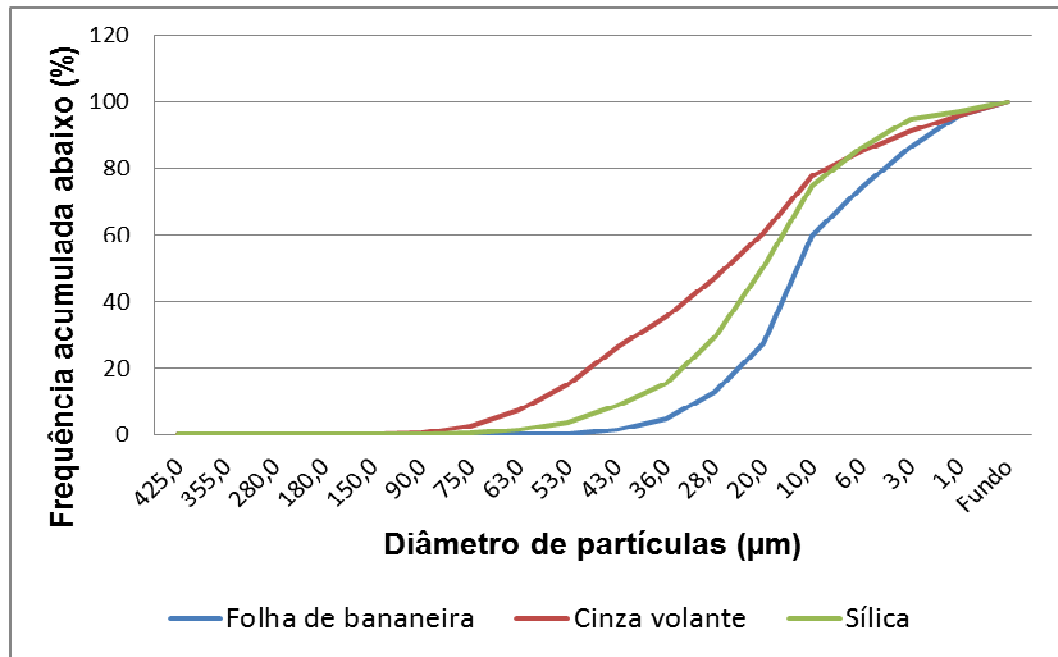


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica das pozolanas

Notou-se pela Tabela 4.4 que o diâmetro médio das partículas de cinza volante (29,33 µm) e sílica ativa (21,84 µm) foram, em média, 50,05% e 32,88% maiores que as partículas de cinza de folha de bananeira (14,66 µm).

Verificou-se pela Figura 4.3 que a distribuição granulométrica das pozolanas foi contínua, não mostrando picos acumulativos de material entre as peneiras.

VARGAS (2007) estudou o comportamento da cinza volante álcali-ativada com solução combinada de NaOH e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e como resultado o autor verificou que o diâmetro médio das partículas foi 29,21 µm, cerca de 0,41% menor que a cinza volante empregada neste estudo (29,33 µm).

#### 4.2.3 Fluorescência de raios X

As análises químicas dos óxidos presentes nos materiais em questão e seus resultados apresentam-se descritos na Tabela 4.5.



Tabela 4.5 – Análise química das pozolanas

Teor de óxidos	Cinza de folha de bananeira (%)	Cinza volante (%)	Sílica ativa (%)	Requisitos da NBR 12653/92
SiO <sub>2</sub>	48,7	69,4	96,9	Teor mínimo de óxidos de SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em 50%
CaO	17,8	1,9	0,2	
MgO	9,3	0,6	0,3	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	21,2	0,1	
K <sub>2</sub> O	7,5	1,6	0,5	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,7	0,1	< 0,1	Quantidade máxima de SO <sub>3</sub> em 5%
SO <sub>3</sub>	1,6	0,4	0,1	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4	2,8	< 0,1	
MnO	1,0	< 0,1	< 0,1	
Cl	0,3	< 0,1	0,1	
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,2	0,1	Quantidade máxima de Na <sub>2</sub> O em 1,5%
BaO	0,2	< 0,1	< 0,1	
TiO <sub>2</sub>	0,2	0,7	< 0,1	
SrO	0,1	< 0,1	< 0,1	
Rb <sub>2</sub> O	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
ZnO	< 0,1	< 0,1	< 0,1	Perda ao fogo (PF) máximo de 6%
CuO	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
PF	5,06	1,07	1,67	
<b>Soma</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

A fluorescência de raios X da cinza de folha de bananeira; da cinza volante e da sílica ativa atenderam aos parâmetros estipulados pela norma NBR 12653/92, tendo valores de 52,77%; 93,4% e 97,1% na somatória dos valores de SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em que se estabelece um mínimo de 50%.

ARAÚJO (2006) e RAEDER FILHO (2005) verificaram em seus trabalhos que a quantidade de SiO<sub>2</sub> presente na sílica ativa situou-se próximo aos valores encontrados neste estudo, o que também foi constatado por HOPPE FILHO (2008), GAVA *et al.* (1999) e SILVA *et al.* (1999) e VARGAS (2007) para a cinza volante. SIQUEIRA (2011) tendo estudado reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral na produção de argamassas encontrou valores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mínimos estabelecidos pela norma NBR12653/92, embora a somatória dos referidos elementos tenham superado o mínimo de 50% verificou-se que a quantidade de SiO<sub>2</sub> (33,80%) foi 46,69% menor que a cinza volante estudada neste trabalho (69,40%).

A quantidade SO<sub>3</sub> encontrada foi de 1,59%; 0,4% e 0,1% (CB, CV e Si), sendo inferior a 5% previsto, uma vez que valores elevados podem provocar expansão pela

formação de etringita nas primeiras horas de hidratação das partículas de cimento Portland.

A perda ao fogo para os materiais foi de 5,06%; 1,07% e 1,67% (CB, CV e Si), estando abaixo dos 6% máximos permitidos. A perda ao fogo apresenta como resultados a quantidade de material não totalmente calcinado existente nas cinzas, influenciando desta forma na quantidade de água de amassamento. Embora a cinza de folha de bananeira tenha apresentado cerca de 5,06% de material não totalmente calcinado, esta ainda se encontra abaixo do limite previsto pela norma NBR 12653/92, o que favorece a utilização deste material como aglomerante alternativo.

A quantidade de  $\text{Na}_2\text{O}$  responsável pelo aparecimento de eflorescência ou da ocorrência da reação álcali agregado foi de 0,21%; 0,2% e 0,1%, sendo este valor inferior à 1,5%.

A cinza de folha de bananeira e a cinza volante classificam-se como uma pozolana de classe E, e a sílica ativa como de Classe N, conforme parâmetros estabelecidos pela norma NBR12653/92, apresentado na Tabela 2.6.

#### 4.2.4 Difração de raios X

Os picos apresentados nos difratogramas gerados pelas análises dos materiais pozolânicos tiveram como premissa a identificação dos principais minerais de fase cristalina, comparando-se os ângulos 2 Teta dos picos presentes com padrões designados pelo *Internacional Centre of Diffraction Data (ICDD)*.

Os dados obtidos pela análise de difração possibilitaram quantificar o grau e a amorficidade de cada amostra, correlacionando os valores obtidos com os do fluoreto de lítio, material qual foi diluído em 10% nas amostras analisadas.

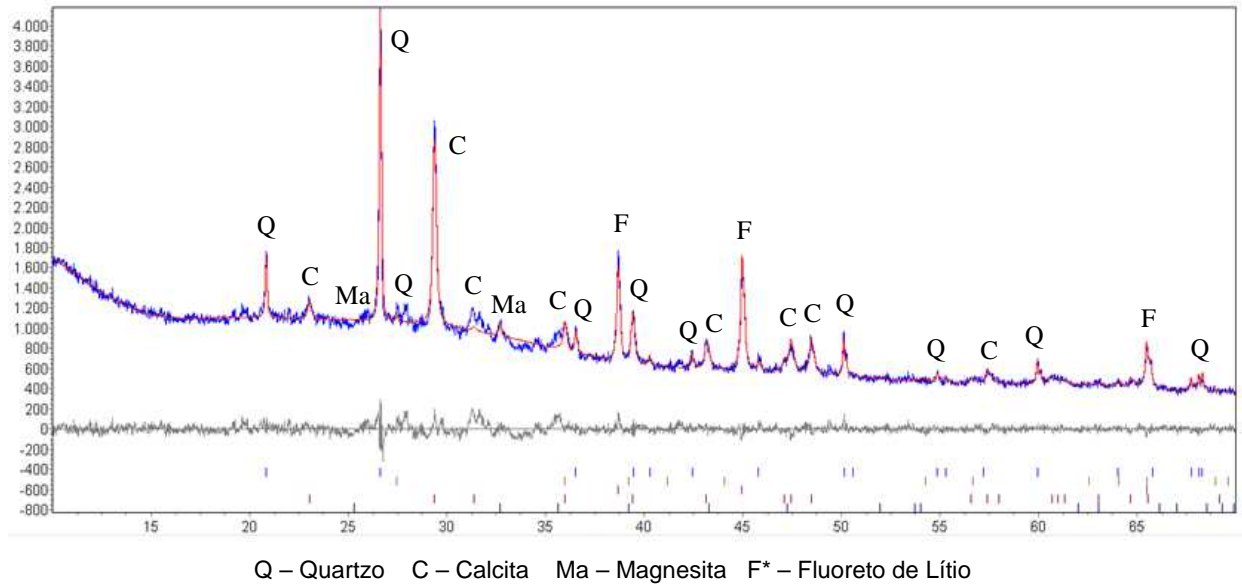
Os resultados da análise por difração de raios X possibilitou verificar a presença de formas cristalinas nas cinzas de folha de bananeira e na cinza volante, como observado nas Figuras 4.4a e 4.4b. Embora, não haja muitos registros de estudos da temperatura de queima da folha de bananeira, no trabalho desenvolvido por KANNING (2010) optou-se pela sua queima entre 500 °C e 900 °C, por analogia aos trabalhos sobre cinza de casca de arroz desenvolvido por ISAIA (2005), MORAES (2001) e WEBER (2001), por se tratar de um material orgânico como a casca de arroz.

A queima da folha de bananeira favoreceu a produção de cinzas amorfas de alta pozolanicidade com grau de amorficidade de 83,20%. A difração de raios X mostrou a presença de formas cristalinas com concentrações de 8,45% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ); 6,47% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e 0,67% de magnesita ( $\text{Mg}(\text{CO}_3)$ ), que reduz a atividade pozolânica do material por serem matérias de pouca ou nenhuma reatividade. Provavelmente, as formas cristalinas foram originadas devido ao resfriamento lento da cinza de folha de bananeira dentro do forno, uma vez que após a queima a cinza permaneceu em temperaturas na ordem de 80 °C até sua retirada do interior do forno.

A cinza volante apresentou um grau de amorficidade de 58,6% e presença de materiais cristalinos em concentrações de 20,3% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ); 0,7% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e 19,4% de mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_3$ ), sendo estes não reativos e com baixo valor pozolânico, também encontrado no estudos efetuados por HOPPE FILHO (2008) e VARGAS (2007).

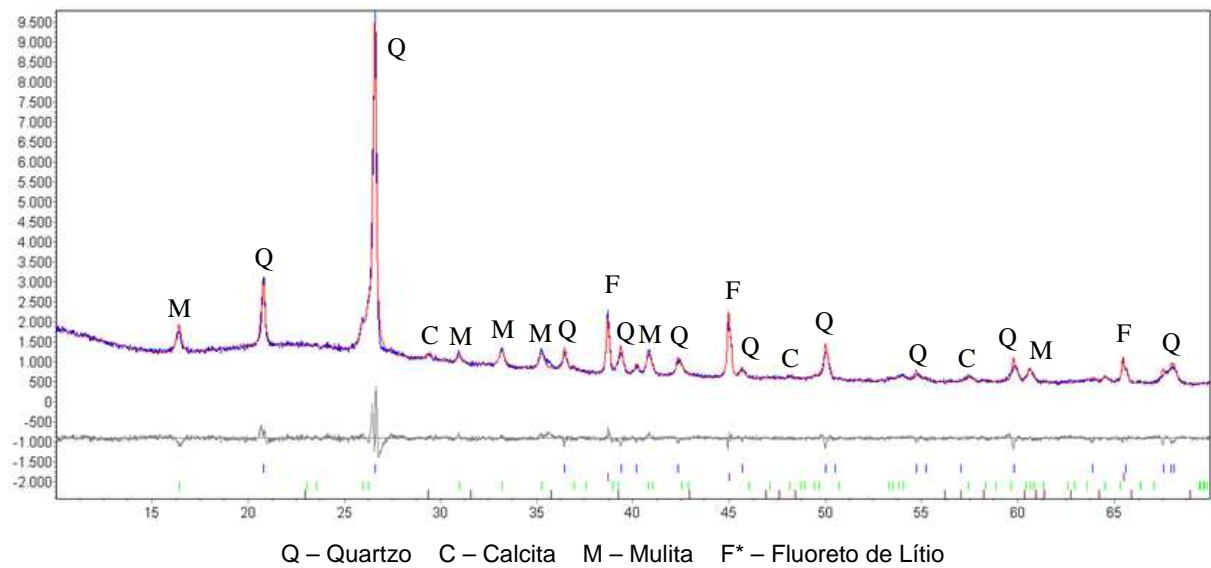
Verificou-se também no trabalho de VARGAS (2007) que o comportamento da cinza volante por ele estudada apresentou um difratograma que foi muito semelhante ao da cinza empregada neste estudo. Conforme descreve a norma NBR11578 (1991) a cinza volante é considerada um material cimentício alternativo comumente empregado na produção dos cimentos do tipo Portland de classe CII – Z, com substituição de até 14% do clínquer por cinza volante e do cimento Portland tipo CIV, com substituição de 15% até 50% do clínquer por cinza volante, como abordam os parâmetros da norma NBR 5736/91.

A análise da sílica ativa apresentou-se com 99,7% de amorficidade, sendo esta constituída com 0,3% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), não acusando nenhum pico bem definido no difratograma, apenas uma suave curva com alto teor de ruído, também conhecido como halo amorfo, demonstrando desta forma a sua alta reatividade, resultado também encontrado por NITA (2006).



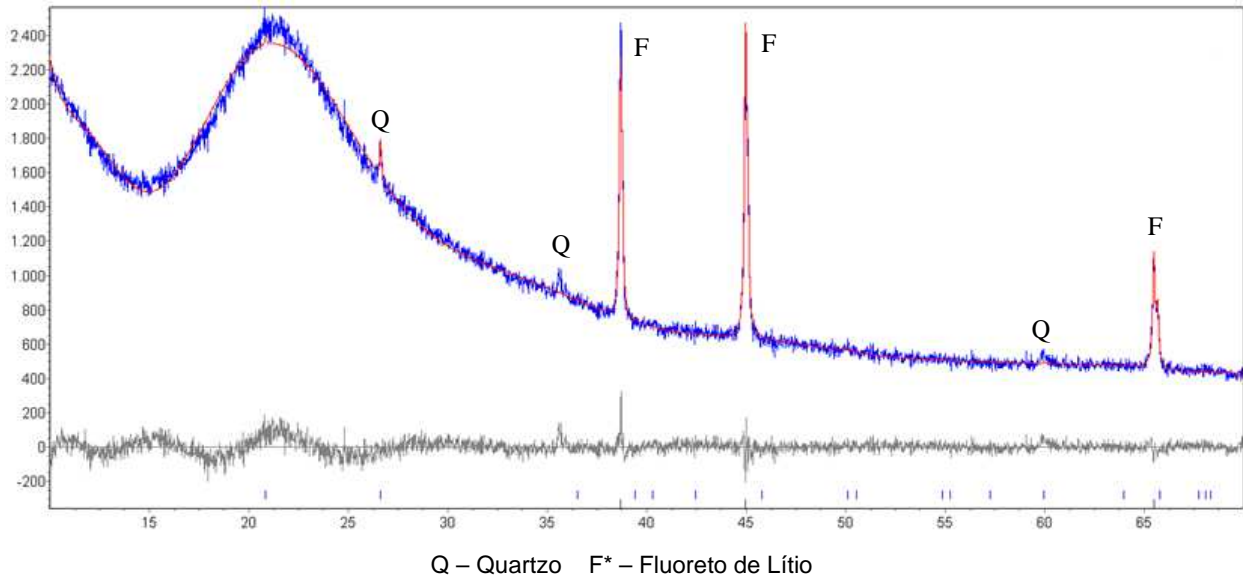
\* Material diluído na amostra, apresentando-se de forma cristalina para calculo do percentual de amorficidade

Figura 4.4a – Difração de raios-X da cinza de folha de bananeira



\* Material diluído na amostra, apresentando-se de forma cristalina para calculo do percentual de amorficidade

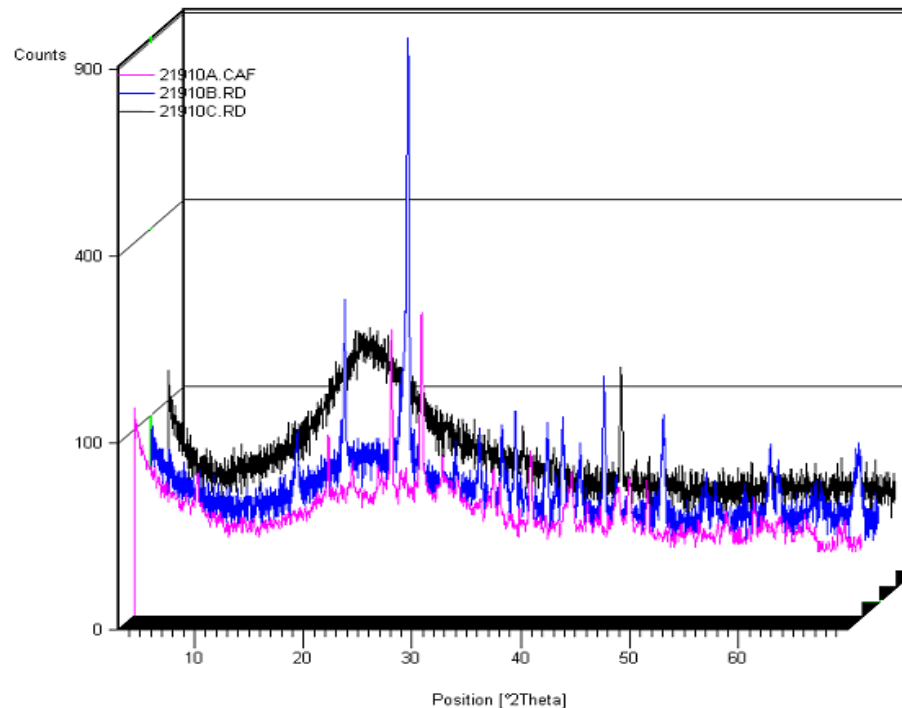
Figura 4.4b – Difração de raios-X da cinza volante



\* Material diluído na amostra, apresentando-se de forma cristalina para calculo do percentual de amorficidade

Figura 4.4c – Difração de raios-X da sílica ativa

Sobrepondo os difratogramas como visto na Figura 4.4d pode-se observar que a cinza volante foi o material que apresentou o maior pico de material não reativo e com baixa atividade pozolânica, quando em contato com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , o que interfere significativamente nos resultados de índice de atividade pozolânica, abordados no item 4.2.9.



21910A - Cinza de folha de bananeira    21910B - Cinza Volante    21910C - Sílica Ativa

Figura 4.4d – Sobreposição dos espectros de difração de raios-X dos materiais pozolânicos

#### 4.2.5 Análise morfológica das cinzas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise dos materiais por meio de microscopia eletrônica de varredura possibilitou verificar que as partículas de sílica ativa apresentaram-se de forma esférica como mostrado na Figura 4.5. Estes resultados também foram observados por ROMANOS *et al.* (2006), quando estudou a influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa, e ACI 234R-96 (2001) apud MENDES (2002), quando efetuou o estudo do concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. A sílica ativa apresentou, em média, teores de 98% de  $\text{SiO}_2$ , variando em função do tipo de liga produzida, o que corrobora com os resultados encontrados por ROMANOS *et al.* (2006).

A área específica média da sílica ativa determinada pela técnica de *Blaine* foi de  $1,084 \text{ m}^2/\text{g}$  e a massa específica de  $2,20 \text{ g/cm}^3$ , também encontrado por NEVILLE (1997), sendo este menor que a do cimento Portland com adição de filer calcário, que foi de  $3,11 \text{ g/cm}^3$ .

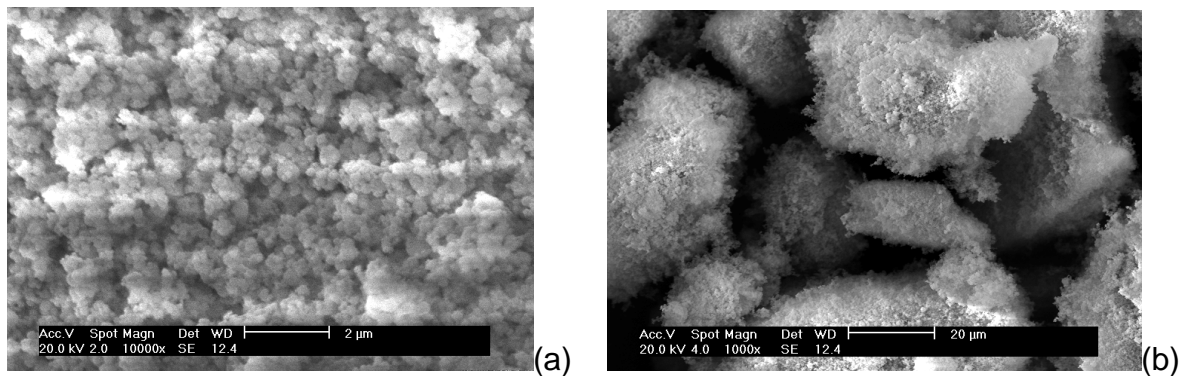


Figura 4.5 - Micrografia da Sílica Ativa (a) e de um grumo de partículas de Sílica Ativa (b)

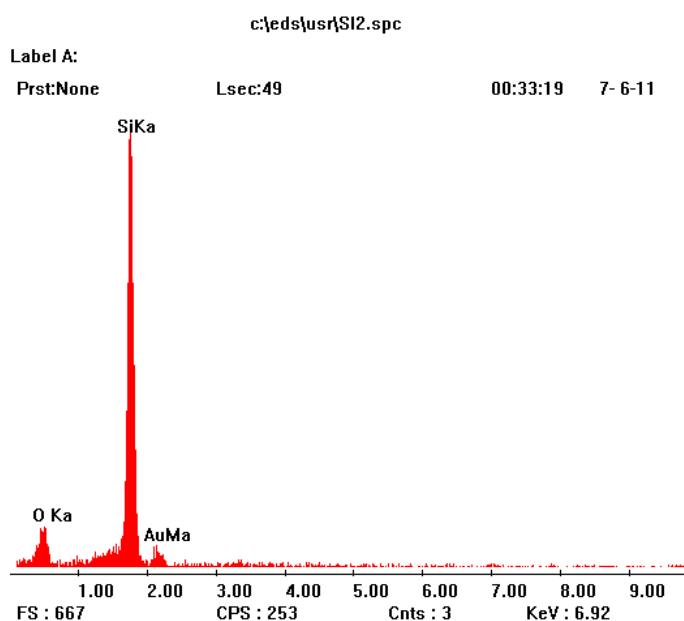


Figura 4.6 - Espectro de EDS correspondente à região da Sílica Ativa analisada na região (b)

A análise semi-quantitativa do espectro de EDS encontra-se listado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na sílica ativa

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
O K	0,0965	28,562	41,241
SiK	0,9035	71,438	58,759
Total	1,0000	100,00	100,00

Conforme a análise do espectro de EDS (Figura 4.5a) realizada na sílica ativa, os elementos em maior concentração foram o silício (71,438%) e o oxigênio (28,562%).

A análise das partículas de cinza volante por meio de MEV demonstrou que a maior parte das partículas das cinzas volantes são esferas sólidas (microesferas), como visto na Figura 4.7a. Apresentam-se em alguns casos, contendo a presença de partículas ocas (plerosfera) e angulosas, como mostrado na Figura 4.7b. Esta tendência foi verificada por VARGAS (2007) e AITCIN (2000) onde a morfologia das partículas de cinza volante também se deu de formas esféricas, angulas e em alguns

casos contendo microesferas no interior de partículas ocas maiores. A cinza volante apresentou superfície específica em torno de  $0,84 \text{ m}^2/\text{g}$ , possuindo massa específica de  $2,08 \text{ g/cm}^3$ .

A cinza volante apresentou na sua composição os elementos Si; O; Al; e K, como visto no EDS da Figura 4.8.

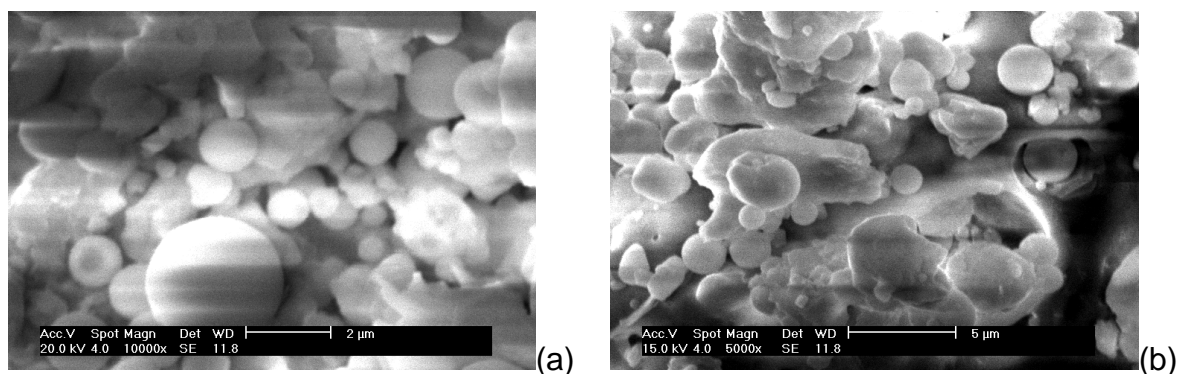


Figura 4.7 - Micrografia de uma amostra de cinza volante (a), partículas esféricas e algumas partículas ocas e angulosas (b)

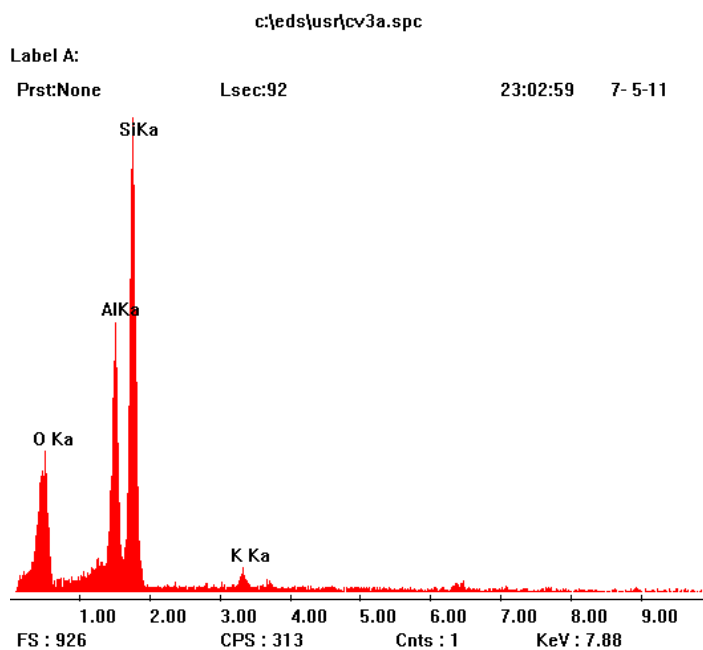


Figura 4.8 - Espectro de EDS correspondente à Cinza Volante da região (a)

A análise quantitativa dos espectros de EDS estão listados na Tabela 4.8.



Tabela 4.7 – Análise semi-quantitativa da região do EDS analisado

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
O K	0,1837	36,372	50,029
AlK	0,2649	19,118	15,592
SiK	0,5179	42,257	33,110
K K	0,0335	2,253	1,268
Total	1,0000	100,00	100,00

A análise do espectro de EDS (Figura 4.8) da cinza volante mostrou a presença dos elementos em maior concentração como o oxigênio (50,029%); o silício (33,110%), o alumínio (15,592%) e o potássio (1,268%).

Os elementos encontrados no espectro de EDS da cinza volante, quando combinado apresentaram, em média teores, de 69,4% de  $\text{SiO}_2$ , 21,1% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 1,6% de  $\text{K}_2\text{O}$ , como mostrado pela análise química por fluorescência de raios X na Tabela 4.7.

A análise das partículas de cinza de folha de bananeira demonstram que a maior parte das partículas são angulosas com tamanhos que variaram de 1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio, como mostrado na Figura 4.9. A cinza de folha de bananeira apresentou superfície específica em torno de 1,378  $\text{m}^2/\text{g}$ , possuindo massa específica de 2,44  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

A cinza de folha de bananeira apresentou na sua composição os elementos Si; O; Al; K; Ca, Mg e P, como visto no EDS da Figura 4.10.

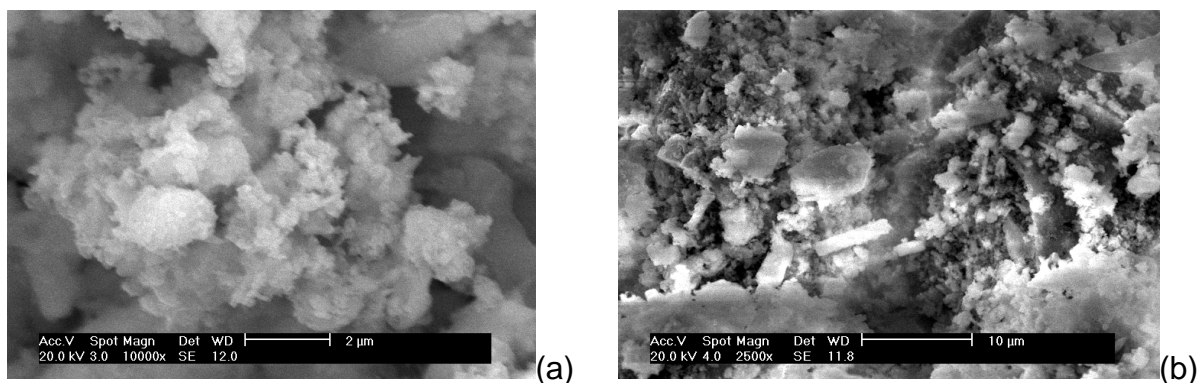


Figura 4.9 - Micrografia da cinza de folha de bananeira (a), partículas angulosas (b)

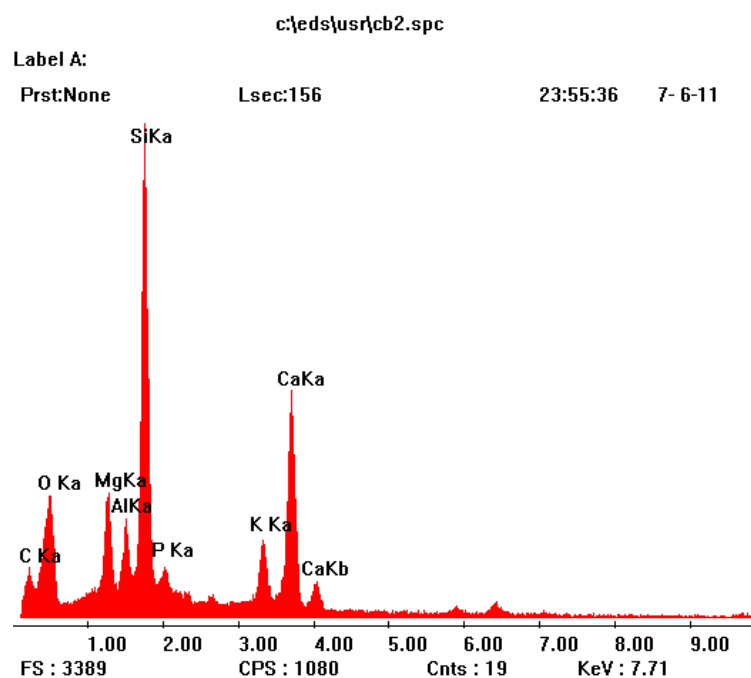


Figura 4.10 - Espectro de EDS correspondente à cinza de folha de bananeira região (a)

A análise quantitativa dos espectros de EDS estão listados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Análise quantitativa dos elementos presentes na cinza de folha de bananeira

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
C K	0,0011	0,394	0,787
O K	0,0970	31,218	46,829
Mg K	0,0758	7,994	7,892
Al K	0,0429	4,200	3,736
Si K	0,3257	26,044	22,255
P K	0,0209	2,036	1,578
K K	0,0936	5,998	3,681
Ca K	0,3430	22,116	13,243
Total	1,0000	100,00	100,00

A análise do espectro de EDS (Figura 4.10) da cinza de folha de bananeira mostrou a presença dos elementos em maior concentração como o oxigênio

(46,829%); fósforo (1,578); o carbono (0,787%); o magnésio (7,892%); o alumínio (3,736); o silício (22,255%); o potássio (1,578%); e o cálcio (13,243%).

#### 4.2.6 Determinação do resíduo na peneira 45 $\mu\text{m}$

Após a realização da moagem da cinza de folha de bananeira no tempo de 30 minutos pré determinados, efetuou-se o peneiramento via úmida, conforme parâmetros da norma NBR 9202/85. Os seus resultados estão apresentados na Tabela 4.9. Para melhor representar os dados obtidos pelo peneiramento foi elaborado o gráfico dos valores constantes na Tabela 4.9, conforme Figura 4.11.

Tabela 4.9 – Quantidade de material retido na peneira de malha 45  $\mu\text{m}$

Tempo de moagem da pozolana (h)	Quantidade inicial de material (g)	Quantidade média de material retido (g)			Material retido (%)			Média (%)
		1	2	3	1	2	3	
<b>Cinza de folha de bananeira</b>	1,000	0,149	0,153	0,151	14,9	15,3	15,1	11,0
<b>Cinza volante</b>	1,000	0,359	0,363	0,370	35,9	36,3	37,0	36,4
<b>Sílica ativa</b>	1,000	0,137	0,142	0,139	13,7	14,2	13,9	15,1

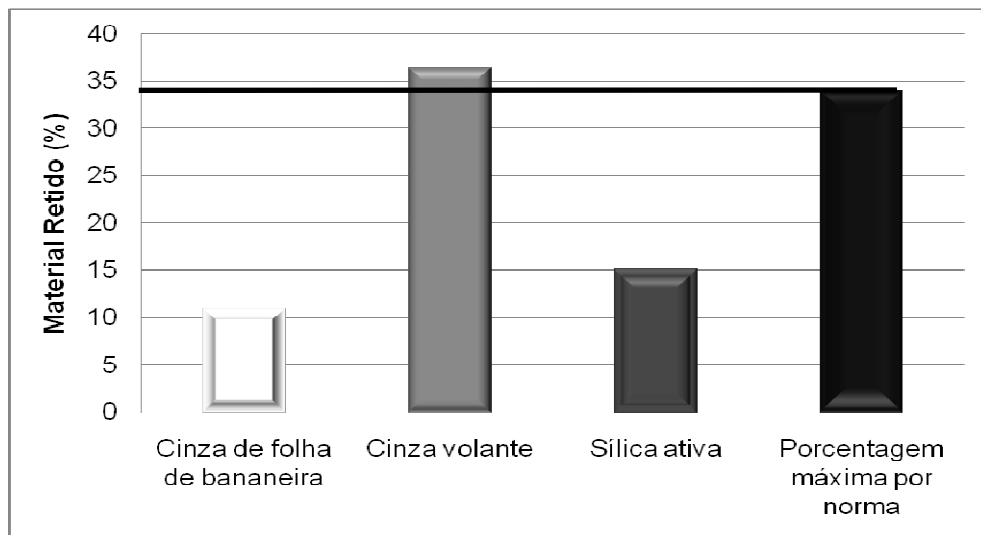


Figura 4.11 – Porcentagem de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$

Conforme os testes realizados, verificaram-se valores médios de 11,0%; 36,2%, e 15,1% dos respectivos materiais: cinza de folha de bananeira; cinza volante e sílica ativa retidos na peneira 45  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Dentre os valores apresentados notou-se que a quantidade de cinza de folha de bananeira e sílica ativa foram inferiores ao máximo permitido de 34% pela norma NBR 12653/92 como observado na Figura 4.11.

Para a cinza volante foram observados valores de 36,2% de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , sendo que, deste valor, 6,46% superaram o limite inferior de norma, sendo confirmado com a análise granulométrica via laser apresentada no item 4.2.1. A grande porcentagem de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  demonstrou comportamento semelhante estudado por OWENS (1979) citado por NETTO (2006), que acarreta no aumento da quantidade de água para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade. Embora a referência abordada tenha apresentado o mesmo resultado encontrado neste trabalho, outras referências relatam efeitos favoráveis na trabalhabilidade das argamassas, quando estas apresentam morfologias em sua grande maioria esféricas.

Por apresentar partículas com dimensões maiores que a cinza de folha de bananeira e a sílica ativa, sua reação pozolânica se dá de forma mais lenta acarretando em menores valores de resistência mecânica à compressão quando comparados com a mesma proporção de adição obtido no índice de atividade pozolânica com a cal (item 4.2.9).

Analisando os resultados da quantidade de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  pelo método estatístico ANOVA, notou-se que os resultados apresentaram diferenças significativas estatisticamente a um nível de 95% de significância.

#### 4.2.7 Massa específica das pozolanas

Os resultados de massa específica para as diferentes pozolanas estão apresentados na Tabela 4.10 e na Figura 4.12.

Tabela 4.10 – Massa específica da cinza para os diferentes tempos de moagem

Tempo de Moagem (horas)	Amostra (g/cm <sup>3</sup> )			Massa específica média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão
	1	2	3		
Cinza de folha de bananeira	2,43	2,43	2,45	2,44	0,012
Cinza volante	2,07	2,10	2,08	2,08	0,015
Sílica ativa	2,19	2,23	2,20	2,20	0,020

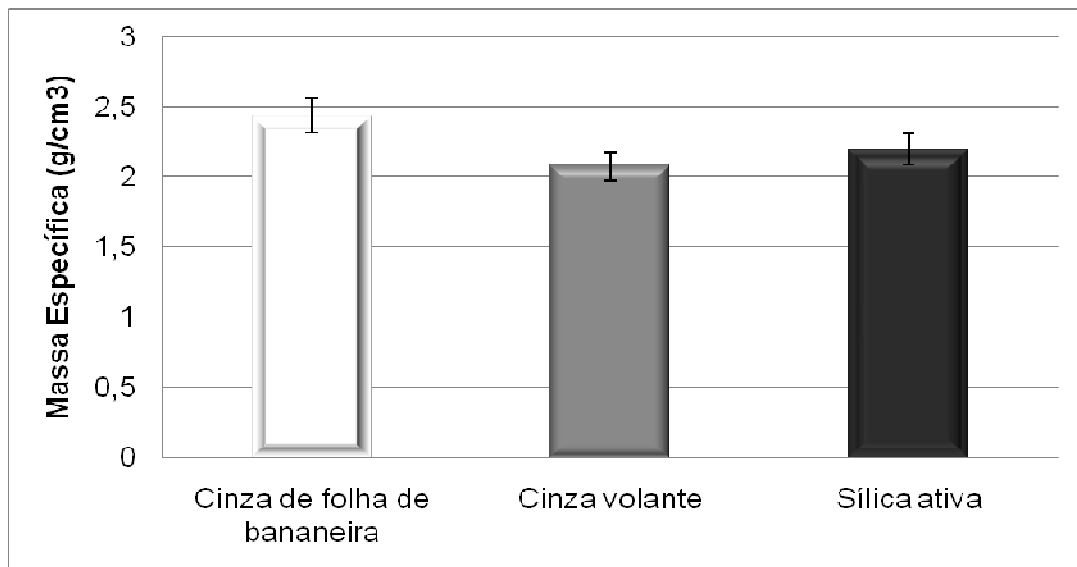


Figura 4.12 – Massa específica das pozolanas

Observa-se na Figura 4.12 que a massa específica da cinza de folha de bananeira é 14,75% superior a massa específica da cinza volante e 9,84% superior a da sílica ativa, respectivamente.

Com base nos dados obtidos na Tabela 4.10 realizou-se uma análise de variância para os valores de massa específica, concluindo-se com um grau de confiança de 95% que existiram diferenças estatisticamente significativas de massa específica entre os diferentes materiais.

#### 4.2.8 Método de permeabilidade ao ar – método *Blaine*

Na Tabela 4.11 e Figura 4.13 estão apresentados os resultados de permeabilidade ao ar, evidenciando-se os dados obtidos.

Tabela 4.11 – *Blaine* das diferentes pozolanas

Material	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
Cinza de folha de bananeira	13780
Cinza volante	8400
Sílica ativa	10840

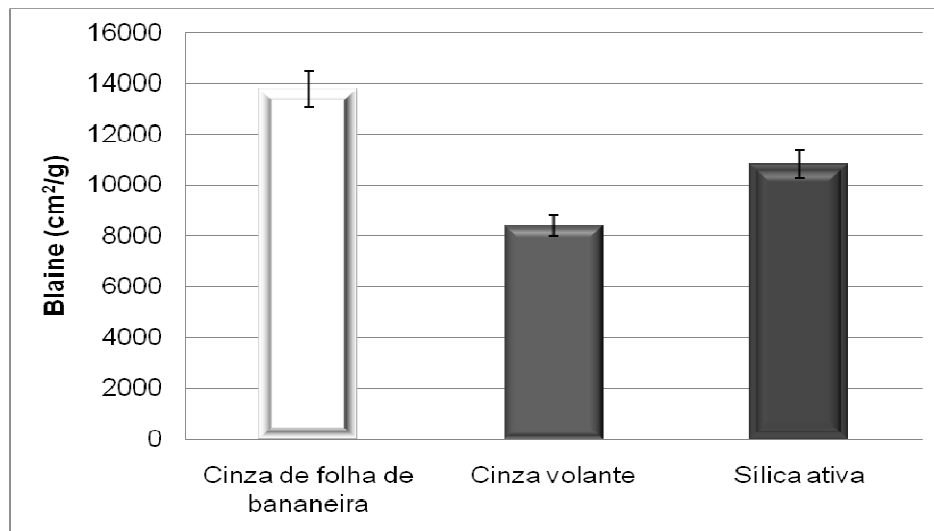


Figura 4.13 – Variação do *Blaine* para os diferentes materiais

Observou-se que os valores de *Blaine* tanto para a cinza de folha de bananeira como para a sílica ativa foram próximos aos valores de sílica (13000 cm<sup>2</sup>/g), descrito por HOLLAND (2005).

O aumento no *Blaine* da cinza de folha de bananeira e da sílica ativa favoreceu no aumento dos pontos de nucleação entre os materiais pozolânicos com os compostos do cimento Portland (Ca(OH)<sub>2</sub>). Este aumento teve relação direta nos resultados de atividade pozolânica com a cal, como visto no item 4.2.9.

Embora a cal utilizada neste ensaio não fosse um material gerado durante as reações químicas do cimento Portland, esta continha em sua grande maioria o

$\text{Ca(OH)}_2$ , que quando em contato com as partículas de pozolana formavam CSH, passando então a apresentar propriedades cimentantes.

#### 4.2.9 Índice de atividade pozolânica com a cal

Na Tabela 4.12 e Figura 4.14, estão descritos e apresentados na forma gráfica, respectivamente, os resultados obtidos nos testes de índice de atividade pozolânica com a cal.

Tabela 4.12 – Índice de atividade pozolânica individual com a cal

Tempo de moagem (h)	Resistência individual dos corpos de prova (MPa)						Média (MPa)	Desvio padrão
	1	2	3	4	5	6		
<b>Cinza de folha de bananeira</b>	7,8	8,0	7,8	7,9	8,0	8,0	7,9	0,098
<b>Cinza volante</b>	5,9	5,9	6,0	6,0	6,1	6,0	6,0	0,075
<b>Sílica ativa</b>	7,5	7,7	7,5	7,5	7,6	7,5	7,6	0,084

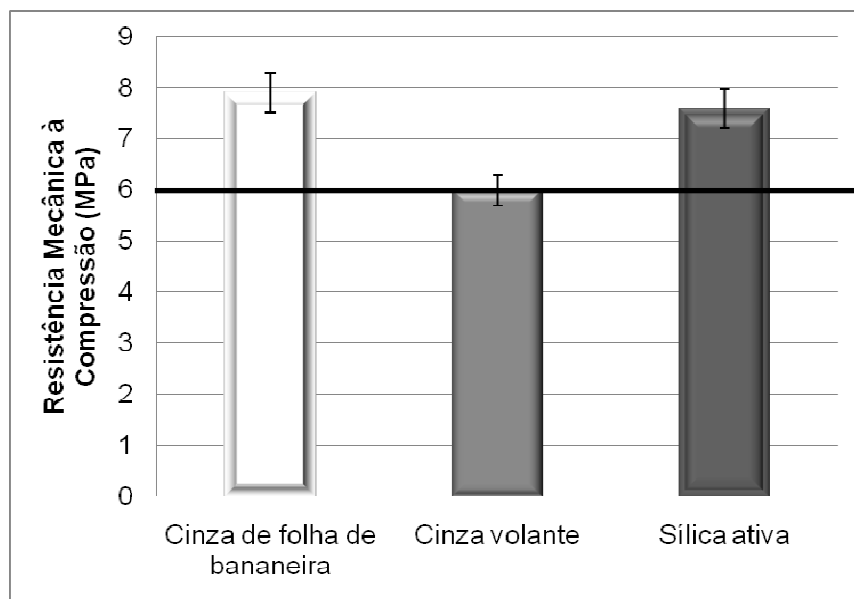


Figura 4.14 – Índice de atividade pozolânica com a cal para os diferentes materiais

Notou-se na Figura 4.14 que o acréscimo de resistência dos corpos de prova foi de 31,67% e de 26,67%, para a cinza de folha de bananeira e para a sílica ativa, respectivamente.

Os resultados de índice de atividade pozolânica com a cal para a cinza volante atenderam à resistência mínima de 6 MPa, aos 7 dias, como preconizado pela norma NBR5751/92, podendo este ser empregado como material pozolânico em argamassas e concretos. Verifica-se no entanto que outros estudos como é o caso do trabalho desenvolvido por GAVA *et. al.* (1999) que o IAP da cinza volante estudada foi 39,67% superior ao encontrado neste trabalho. A redução da resistência mecânica no ensaio de IAP pode ter sido decorrente da presença de materiais com pouca ou nenhuma reatividade (quartzo, calcita e mulita), como mostrado pelos picos do ensaio de Difração de raios-X, bem como pela grande quantidade de material retido na peneira 45 $\mu$ m, como visto no item 4.2.6.

Quanto à cinza de folha de bananeira, não há normalização pertinente quanto à sua utilização como material alternativo para adição ou substituição ao cimento Portland, porém como este material é de origem orgânica como a casca de arroz, acredita-se na possibilidade de adição ou substituição possam chegar a 40% ou mais.

Verifica-se que embora a quantidade de SiO<sub>2</sub> presente na cinza de folha de bananeira tenha sido 50,25% menor que a quantidade presente a sílica ativa, esta ainda apresentou resistência mecânica 3,95% superior que a sílica ativa. Tal fator pode ser sido decorrente da redução em cerca de 48,98% do diâmetro médio das partículas de cinza de folha de bananeira (14,66 $\mu$ m) em relação a sílica ativa (21,84  $\mu$ m), bem como um aumento no *Blaine* da cinza de folha de bananeira em 27,12% (13780cm<sup>2</sup>/g) em relação a sílica ativa (10840cm<sup>2</sup>/g).

#### 4.2.10 Ensaio de Chapelle Modificado

Na Tabela 4.13 e Figura 4.15, estão apresentados respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios de Chapelle Modificado para a cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa.



Tabela 4.13 – Resultados do Ensaio de Chapelle Modificado

Material	Amostra (mg de CaO/g de pozolanas)			Valor Médio (mg de CaO/g de pozolanas)
	1	2	3	
Sílica Ativa	537	500	487	508
Cinza de Folha de Bananeira	453	400	412	421
Cinza Volante	348	319	327	331

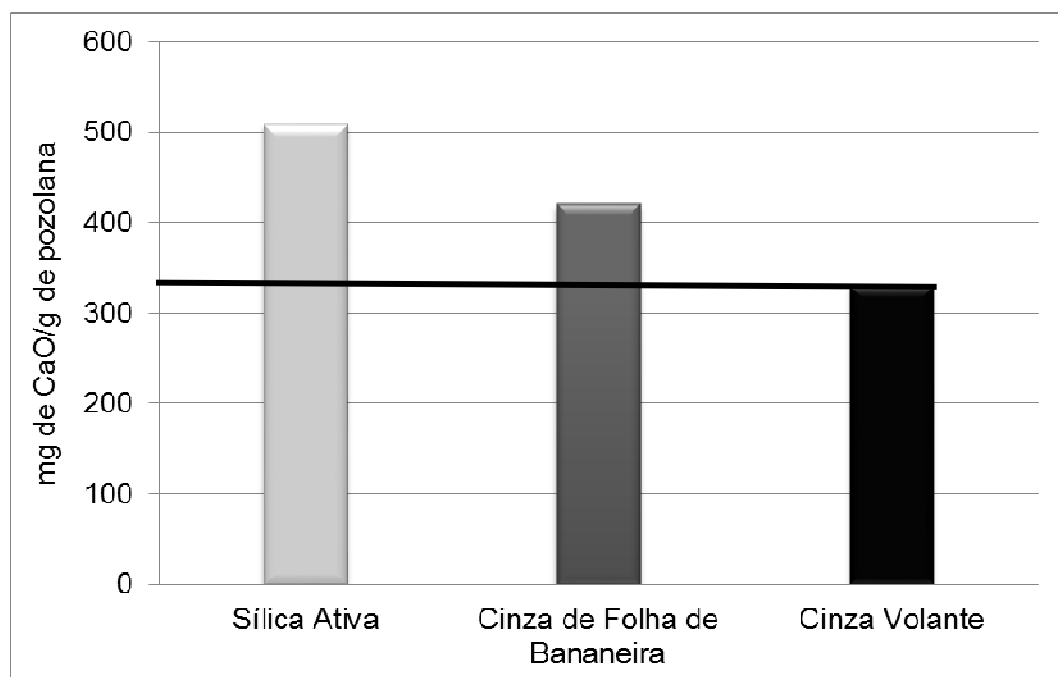


Figura 4.15 – Ensaio de Chapelle Modificado para os diferentes materiais

Os resultados do ensaio de Chapelle Modificado como observado na Figura 4.15 demonstram que os valores médios obtidos são superiores aos estabelecidos por RAVERTY *et al.* (1980) (330 mg de CaO/g de material), sendo 508 mg de CaO/g de sílica ativa como também encontrado por BONNEAU *et al.* (2000) e LACERDA *et al.* (2005), 421 mg de CaO/g de cinza de folha de bananeira e 331 mg de CaO/g de cinza volante o que também foi verificado por HOPPE FILHO (2008). Conforme descreve JOHN *et al.* (2003) o aumento no consumo de CaO pode ter sido decorrente do tamanho das partículas, bem como do grau de amorficidade dos materiais analisados.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

#### 4.3.1 Teste de consistência – “Flow Table”

A relação água/cimento foi definida mediante a consistência de  $(255 \pm 10)$  mm, obtida pela argamassa de referência, conforme norma NBR 13276/05. A relação água/cimento e água/cimento+pozolana se manteve constante. Na Tabela 4.14 estão indicados os consumos de água, o fator água/cimento e água/cimento+pozolana, bem como a quantidade de aditivo plastificante empregada em cada argamassa ensaiada, mediante o teste de consistência “Flow Table”.

Tabela 4.14 – Quantidade de material empregado nas argamassas

Argamassa	Cimento (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Areia (g)	Aditivo (g)	Abertura (mm)
Referência	800	0,0	500	2400	0,0	248
5% CB	800	40	500	2400	5,0	251
7,5% CB	800	60	500	2400	5,0	254
10% CB	800	80	500	2400	6,0	250
5% CV	800	40	500	2400	5,0	253
7,5% CV	800	60	500	2400	6,0	252
10% CV	800	80	500	2400	7,0	250
5% Si	800	40	500	2400	5,0	250
7,5% Si	800	60	500	2400	5,0	250
10% Si	800	80	500	2400	5,0	249

Como esperado, para que fosse mantida a mesma relação água/cimento e consistência  $(255 \pm 10)$ mm para cada acréscimo de material fino à mistura, houve a necessidade de acréscimo de aditivo a mistura, que propiciou a redução da tensão superficial da água e tornou as partículas de cimento hidrofílicas, possibilitando que as argamassas atingissem a consistência pré-determinada.

Nota-se na Tabela 4.14 que para as argamassas com sílica ativa houve redução da quantidade de aditivo empregado para se obter a consistência estabelecida pela norma NBR13276/05, quando comparado com a quantidade empregada para as argamassas com cinza de folha de bananeira e a cinza volante.

A redução ocorreu devido às partículas de sílica ativa serem esféricas facilitando desta forma o rolamento das partículas no interior da mistura, o que também foi verificado por MATTOS (2002).

#### 4.3.2 Massa específica no estado fresco

Os resultados dos testes de massa específica das argamassas no estado fresco encontram-se apresentados na Tabela 4.15 e listados na Figura 4.16.

Tabela 4.15 – Massa específica das argamassas no estado fresco

<b>Argamassa</b>	<b>Número de repetições</b>	<b>Soma (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Variância</b>
Referência	3	6,12	2,04	1,59E-05
5% CB	3	6,15	2,05	1,809E-05
7,5% CB	3	6,14	2,04	2,466E-05
10% CB	3	6,15	2,05	5,543E-06
5% CV	3	6,13	2,04	7,061E-06
7,5% CV	3	6,12	2,04	6,816E-06
10% CV	3	6,11	2,03	1,886E-05
5% Si	3	6,11	2,03	2,536E-06
7,5% Si	3	6,15	2,05	4,516E-06
10% Si	3	6,16	2,05	1,543E-05

Analisando os resultados pelo método estatístico ANOVA, concluiu-se que, com um grau de confiança de 95% que existiram diferenças estatisticamente significativas entre as argamassas, aceitando desta forma a hipótese da diferença entre os resultados, concluindo-se, assim, que houve diferenças, na média, entre os grupos.

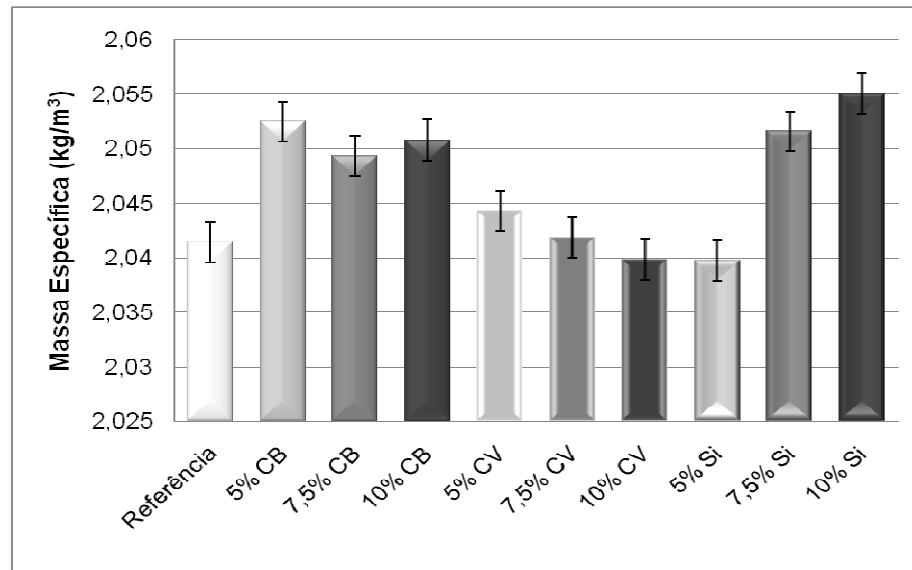


Figura 4.16 – Massa específica das argamassas no estado fresco

Embora haja diferenças estatisticamente significativas de massa específica entre as argamassas, as mesmas foram classificadas segundo a norma NBR 13278/05 como D5, ou seja, com uma massa específica compreendida entre  $1.800 \text{ kg/m}^3$  à  $2.200 \text{ kg/m}^3$ , que, de acordo com ISAIA (2007) puderam ser classificadas como uma argamassa de classe normal. Porém, quanto menor a massa específica, mais leve se torna a argamassa e menos energia o operário irá desprender para sua aplicação. Embora a massa específica das argamassas esteja ligada diretamente com a massa específica dos agregados, notou-se também que a massa específica foi inversamente proporcional a quantidade de ar incorporado na mistura, seja ela pela sua homogeneização ou pela utilização de aditivos incorporadores de ar, como visto na Figura 4.17.

#### 4.3.3 Determinação do teor de ar incorporado

Pela análise dos resultados mostrados na Tabela 4.16 e Figura 4.17, notou-se que as argamassas com adições apresentaram menores teores de ar incorporado quando comparados com a argamassa de referência. Tal fator pode ter sido decorrente da maior quantidade de materiais finos adicionados, bem como da menor relação água/(cimento+pozolana).

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.16 nota-se para a sílica ativa, cinza de folha de bananeira e cinza volante uma relação inversamente

proporcional entre a massa específica e teor de ar incorporado, uma vez que a quantidade de aditivo empregado para se manter a mesma consistência pode ter reduzido a incorporação de ar na mistura.

As quantidades de ar incorporado entre as argamassas analisadas foram diferentes estatisticamente, fator comprovado pela análise estatística pelo método ANOVA, para um grau de significância de 95% de confiança, o que confirma a hipótese do tipo de material, bem como a sua granulometria influenciarem nas características finais das argamassas.

Tabela 4.16 – Teor de ar incorporado das argamassas

<b>Argamassa</b>	<b>Teor de ar incorporado médio (%)</b>
Referência	8,06
5% CB	7,55
7,5% CB	7,73
10% CB	7,69
5% CV	7,76
7,5% CV	7,82
10% CV	7,85
5% Si	7,89
7,5% Si	7,48
10% Si	7,32

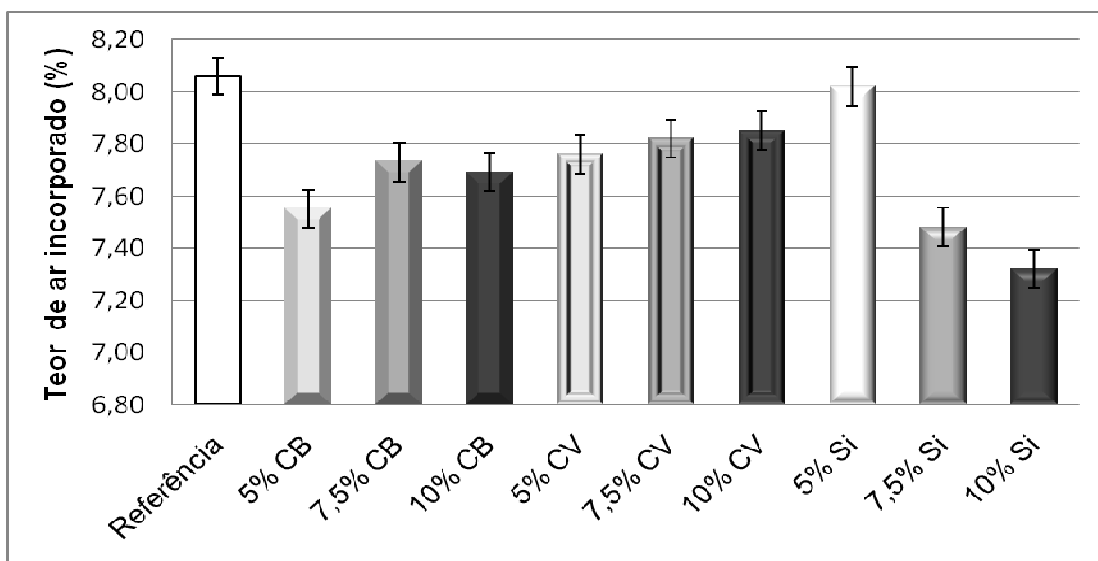


Figura 4.17 – Teor de ar incorporado

#### 4.3.4 Teste de “Squeeze-Flow”

Os resultados do teste de consistência por “squeeze-flow” ou escoamento por compressão axial, foram determinados tomando como base o esforço necessário para comprimir uma suspensão entre duas placas paralelas. O perfil das curvas obtidas encontra-se apresentado na Figura 4.18. Pela análise dos resultados notou-se que as argamassas com adição de material pozolânico apresentaram características reológicas semelhantes quanto à absorção do carregamento por compressão imposto por duas placas paralelas.

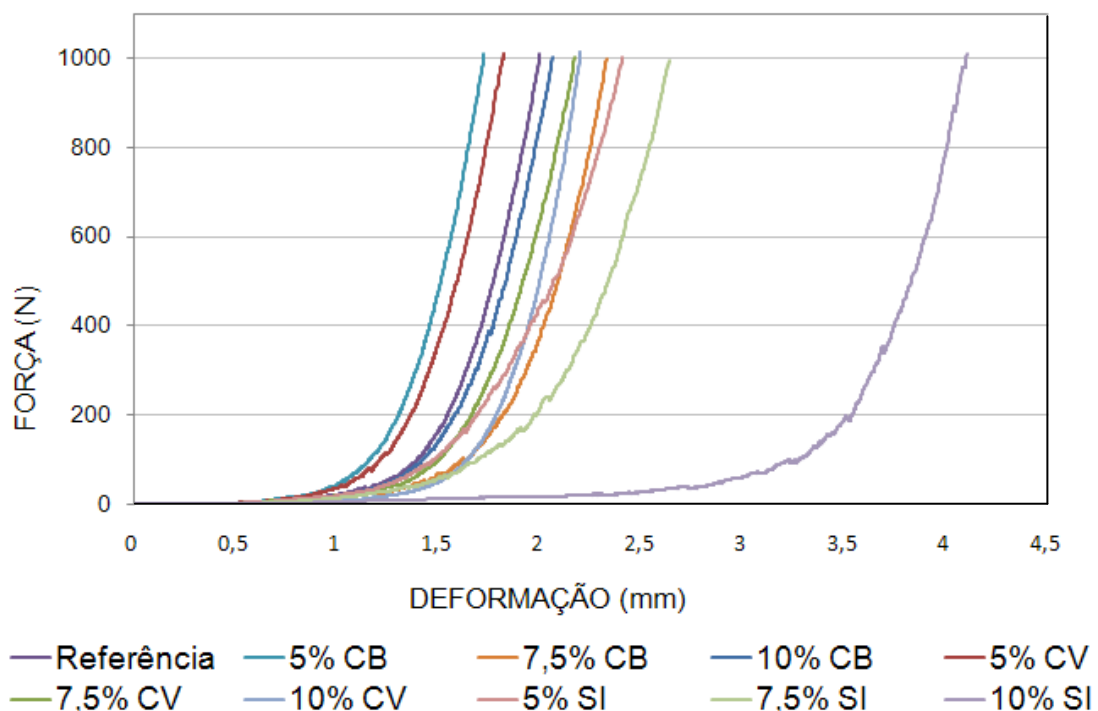


Figura 4.18 – Resultado do teste de “squeeze flow”

Embora as argamassas tenham suportado a mesma carga máxima de compressão, suas deformações foram inferiores à argamassa de referência. Notou-se que a argamassa de referência apresentou maior facilidade para se deformar, devido sua maior quantidade de ar incorporado, o que favoreceu o deslizamento entre os grãos do agregado devido ao afastamento entre as suas partículas.

CARDOSO *et al.* (2005) verificaram que as bolhas de ar reduziram o atrito entre os materiais constituintes da argamassa facilitando desta forma o fluxo e escorregamento da própria pasta e o escorregamento entre os grãos dos agregados. Como as argamassas 5%CB, 7,5%CB, 10%CB, 5%CV, 7,5%CV, 10%CV, 5%Si,

7,5%Si e 10%Si apresentaram em sua composição a adição de material pozolânico para uma mesma relação água/aglomerante, estas se tornaram mais coesas, dificultando o escorregamento entre os grãos.

O comportamento dos gráficos de forma exponencial das cargas aplicadas sobre as argamassas com adição apresentou pouca ou nenhuma deformação plástica e/ou viscosa, passando do estágio elástico linear para outro onde as argamassas apresentam grandes carregamentos com pouca deformação, o que caracterizou o enrijecimento por deformação, causado pelo alto grau de atrito entre os agregados.

Como as argamassas apresentaram teores baixos de ar incorporado, os agregados ficaram muito próximos dificultando o fluxo do material. Tal fator também foi observado por CAVANI *et al.* (1997), onde estes mostraram que a trabalhabilidade não está relacionada somente a quantidade de água da mistura, mas também a quantidade de ar incorporado a mistura. De uma forma geral as argamassas com adição de materiais pozolânicos podem influenciar na produtividade da mão de obra para a sua aplicação. Como a argamassa de referência apresentou menor carregamento para uma grande deformação, esta passou a apresentar maior facilidade de espalhamento pelo operário.

Por outro lado, as argamassas com adições necessitaram de cargas maiores para serem deformadas, podendo, desta forma, apresentar maior dificuldade de aplicação resultando em baixa produtividade, o que pode ser corrigido com o aumento do teor de aditivo plastificante nas misturas.

#### 4.3.5 Determinação da retenção de água

A retenção de água foi determinada conforme a norma NBR 13281/05 e seus resultados estão apresentados na Tabela 4.17 e na Figura 4.19.

Tabela 4.17 – Retenção de água das argamassas (%)

Adição	Argamassa 1	Argamassa 2	Argamassa 3	Média	Desvio Padrão
<b>Referência</b>	75,93	76,38	76,67	76,33	0,3758
<b>5% CB</b>	86,27	86,74	85,79	86,27	0,4736
<b>7,5% CB</b>	88,76	87,67	88,19	88,21	0,5448
<b>10% CB</b>	88,38	88,93	87,40	88,24	0,7765
<b>5% CV</b>	82,92	83,17	83,22	83,10	0,1632
<b>7,5% CV</b>	86,45	87,08	86,77	86,77	0,3171
<b>10%CV</b>	90,78	89,27	89,17	89,74	0,9006
<b>5% Si</b>	89,24	87,79	87,34	88,12	0,9947
<b>7,5% Si</b>	88,12	89,14	89,31	88,86	0,6472
<b>10% Si</b>	91,95	90,90	91,19	91,34	0,5416

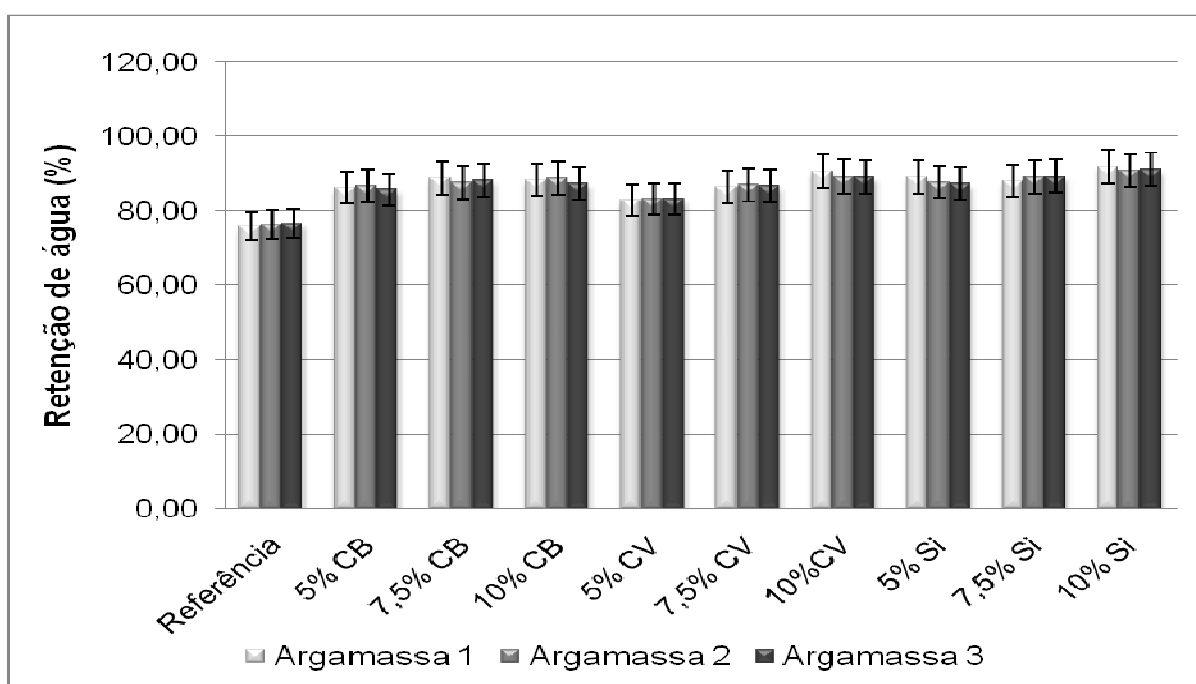


Figura 4.19 – Retenção de água das argamassas para diferentes porcentagens de adição

Observou-se na Figura 4.19 que os valores de retenção de água das argamassas para diferentes adições apresentaram maior porcentagem de retenção de água quando comparados com a argamassa de referência. Tal fato pode ter sido decorrente da absorção de água pelas partículas passantes pela peneira de abertura



0,075 mm, como foram os casos da cinza de folha de bananeira; da cinza volante e da sílica ativa. Como foi empregado aditivo plastificante para se manter o índice de consistência padrão em  $(255 \pm 10)$  mm para todas as argamassas a relação água/aglomerante+adição variou de 0,568 a 0,625, como mostrado na Tabela 4.18.

Analisando os resultados da Tabela 4.18, verificou-se que na medida em que se aumentou a quantidade de finos mantendo-se a mesma quantidade de água, aumentou a retenção de água. Isso se deveu ao fato das partículas de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa, quando misturadas na argamassa aumentaram a segmentação dos vasos capilares existentes nas argamassas, bem como os pontos de nucleação, em consequência disso, ocorreu uma menor percolação de água pelos vasos capilares (DAL MOLIN, 1995 *apud* MENDES, 2002).

A retenção de água pode apresentar influência na retração por secagem, uma vez que a segmentação dos vasos capilares aumenta a estanqueidade das argamassas dificultando a evaporação de água e sua perda para o substrato, fator qual foi observado por CARNEIRO (1999) no estudo da “Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.”

Verifica-se nos resultados do ensaio de arrancamento de argamassa, que a retenção de água das argamassas teve papel importante no não aparecimento de fissuras nas argamassas aplicadas, como visto no item 4.4.6.

Os resultados apresentados para a sílica ativa tiveram seus valores de retenção semelhantes aos encontrados por MATTOS (2002) o que de acordo com o mesmo autor favoreceu na redução da fissuração das argamassas.

Tabela 4.18 – Relação água/aglomerante+adição para as argamassas

Argamassa	Aglomerante (g)	Adição (g)	Água (g)	Relação água/(aglomerante + adição)
<b>Referência</b>	800	0,0	500	0,625
<b>5% CB</b>	800	40	500	0,595
<b>7,5% CB</b>	800	60	500	0,581
<b>10% CB</b>	800	80	500	0,568
<b>5% CV</b>	800	40	500	0,595
<b>7,5% CV</b>	800	60	500	0,581
<b>10%CV</b>	800	80	500	0,568
<b>5% Si</b>	800	40	500	0,595
<b>7,5% Si</b>	800	60	500	0,581
<b>10% Si</b>	800	80	500	0,568

Pela análise dos resultados pelo método estatístico (ANOVA) para um grau de significância de 95%, concluiu-se para o teste de retenção de água que existiram diferenças significativas estatisticamente entre os resultados apresentados para as argamassas com diferentes porcentagens de adição de material pozolânico, aceitando-se desta forma a hipótese de diferença entre os resultados, na média, entre as argamassas.

De acordo com a classificação da norma NBR 13281/05, quanto ao requisito retenção de água, as argamassas foram classificadas como mostrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Valores de retenção de água conforme NBR 13281/05

Classe	Retenção de água (%)	Classificação segundo NBR 13281/05
U1	≤78	-----
U2	72 a 85	Referência; 5%CV
U3	80 a 90	5%CB; 7,5%CB
U4	86 a 94	10%CB; 7,5%CV; 10%CV; 5%Si; 7,5%Si
U5	91 a 97	10%Si
U6	95 a 100	-----

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.4.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.20 e na Figura 4.20.

Pela análise dos resultados apresentados na Figura 4.20 verificou-se que na medida em que se aumentaram as porcentagens de adição dos materiais pozolânicos para cada argamassa, aumentou-se, também, a resistência à tração na flexão. Tal fator pode ter sido decorrente da nucleação dos poros da pasta hidratada, bem como as argamassas com adição apresentarem maior quantidade de material fino para uma mesma relação água/cimento.

Verificou-se pela análise estatística que existiram diferenças estatisticamente significativas entre as resistências mecânicas à tração para as diferentes porcentagens de adição de material pozolânico.

Conforme parâmetros estabelecidos pela norma NBR 13279/05, as argamassas foram classificadas como sendo da classe R6, uma vez que apresentaram resistências superiores a 3,50 MPa.

Tabela 4.20 – Resultados de resistência à tração dos corpos de prova prismáticos

Amostra	Resistência média (MPa)		
	28 dias	56 dias	91 dias
<b>Referência</b>	6,36	6,44	6,25
<b>5% CB</b>	6,70	6,76	7,05
<b>7,5% CB</b>	6,86	6,74	7,17
<b>10% CB</b>	6,90	6,88	7,28
<b>5% CV</b>	6,48	6,74	6,47
<b>7,5% CV</b>	6,29	6,92	7,30
<b>10% CV</b>	6,72	6,94	7,61
<b>5% Si</b>	6,82	7,39	7,64
<b>7,5% Si</b>	7,16	7,56	7,83
<b>10% Si</b>	7,76	7,49	8,47

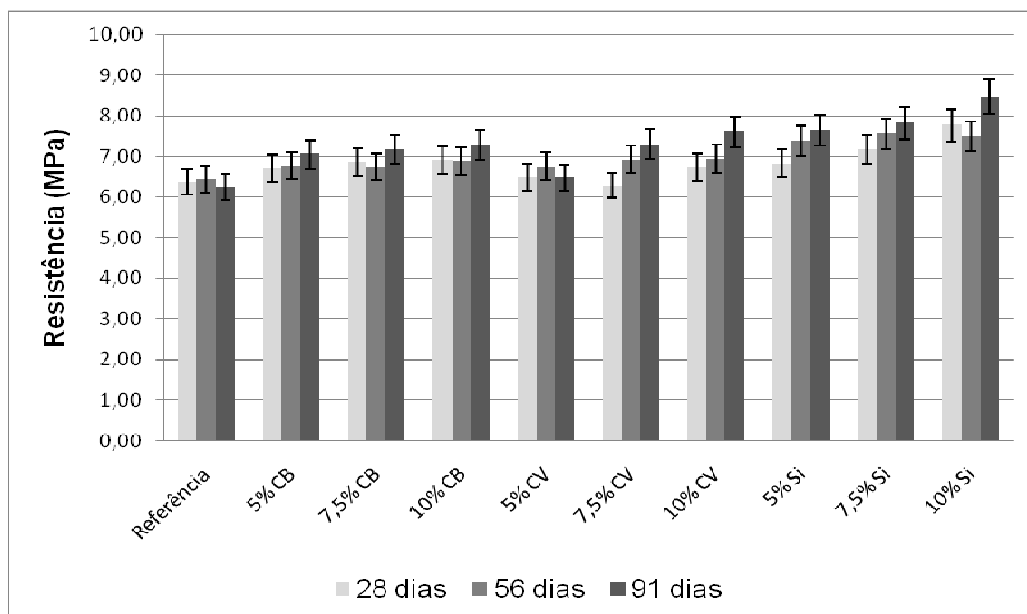


Figura 4.20 – Resistência à tração das argamassas

#### 4.4.2 Resistência à compressão das argamassas

A resistência a compressão foi determinada com 28, 56 e 91 dias e os resultados encontram-se descritos na Tabela 4.21 e apresentados na sua forma gráfica na Figura 4.21.

Tabela 4.21 – Valores de resistência à compressão das argamassas

Amostra	Resistência Média (MPa)		
	28 dias	56 dias	91 dias
<b>Referência</b>	25,79	29,00	31,28
<b>5% CB</b>	32,84	34,40	40,32
<b>7,5% CB</b>	35,68	35,55	40,65
<b>10% CB</b>	35,55	36,09	40,00
<b>5% CV</b>	34,28	35,03	37,24
<b>7,5% CV</b>	34,48	38,07	38,92
<b>10% CV</b>	34,40	35,40	39,08
<b>5% Si</b>	34,28	41,52	43,65
<b>7,5% Si</b>	43,76	44,82	49,28
<b>10% Si</b>	46,17	46,65	48,72

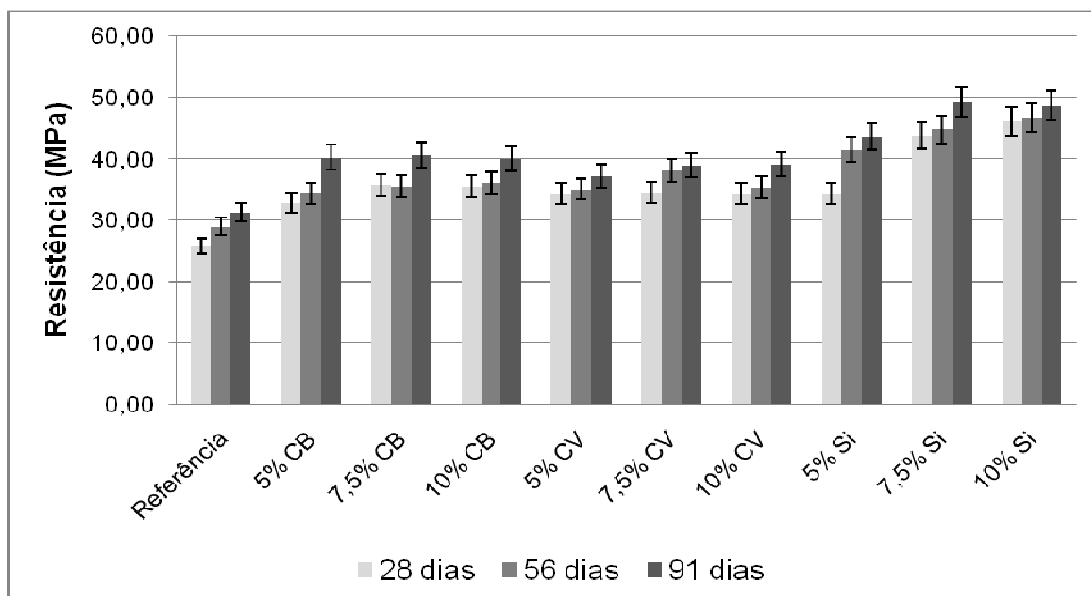


Figura 4.21 – Resistência mecânica à compressão das argamassas

Os resultados de resistência à compressão das argamassas pelo método estatístico ANOVA como apresentado na Tabela 4.22 demonstrou que, com um grau de confiança de 95%, existiram diferenças estatisticamente significativas entre a resistência mecânica à compressão das argamassas, uma vez que o valor  $P = 1,35^{-5}$  foi menor que o grau de significância de 0,05.

Tabela 4.22 - Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à compressão das argamassas com cinza de folha de bananeira e sílica ativa

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	758,6619	9	84,29576	9,797228	1,34E-05	2,392814
Dentro dos grupos	172,0808	20	8,604042			
Total	930,7427	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Verificando os valores de F e Fcrítico, notou-se que  $F > F_{\text{crítico}}$ , aceitando desta forma a hipótese de diferença entre os resultados, concluindo-se, assim, pelas diferenças, na média, entre as argamassas.

Os resultados da Figura 4.21 demonstraram que à medida que ocorreu o aumento das quantidades de adição, aumentaram também as resistências à compressão para as argamassas produzidas com cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa. Também, foi observado que as argamassas com adições de

cinza de folha de bananeira tiveram resistências à compressão inferiores às argamassas com adição de sílica ativa, mas, superiores às argamassas com cinza volante. A diferença foi comprovada estatisticamente pelo método ANOVA, considerando um grau de significância de 95%, como apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à compressão das argamassas com cinza de folha de bananeira e cinza volante

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	758,6619	9	84,29576	9,797228	1,34E-05	2,392814
Dentro dos grupos	172,0808	20	8,604042			
Total	930,7427	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

A relação entre as resistências mecânicas à compressão com o tempo de cura das argamassas com diferentes porcentagens de adições de pozolanas foram significativas, e aconteceram de forma linear para as idades de 28, 56 e 91 dias, como apresentado nas Figuras 4.22; 4.23 e 4.24.

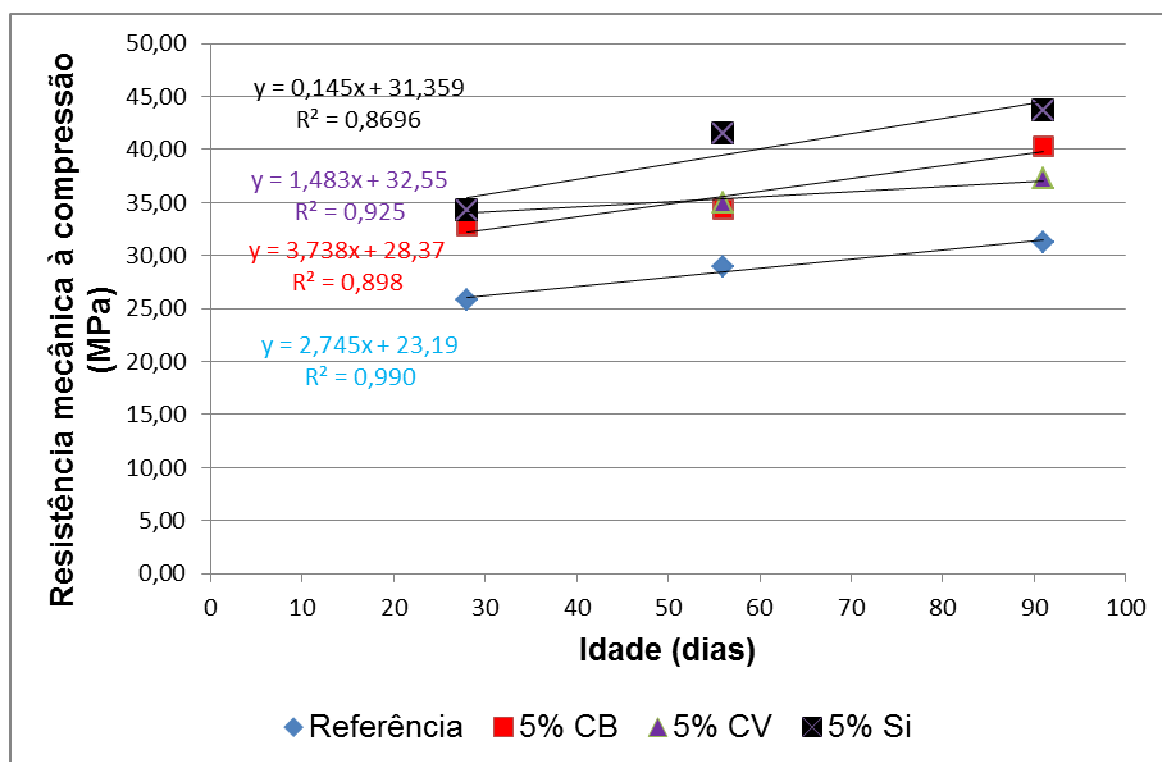


Figura 4.22 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 5% de adição para as argamassas.

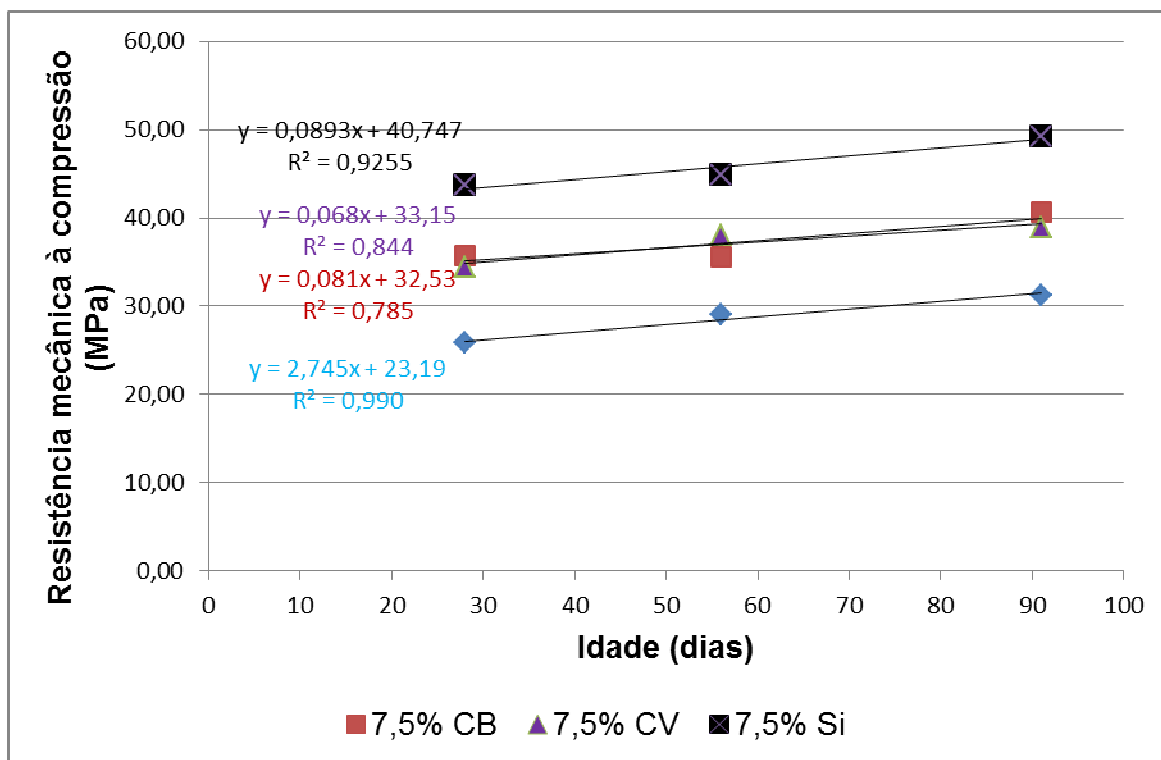


Figura 4.23 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 7,5% de adição para as argamassas.

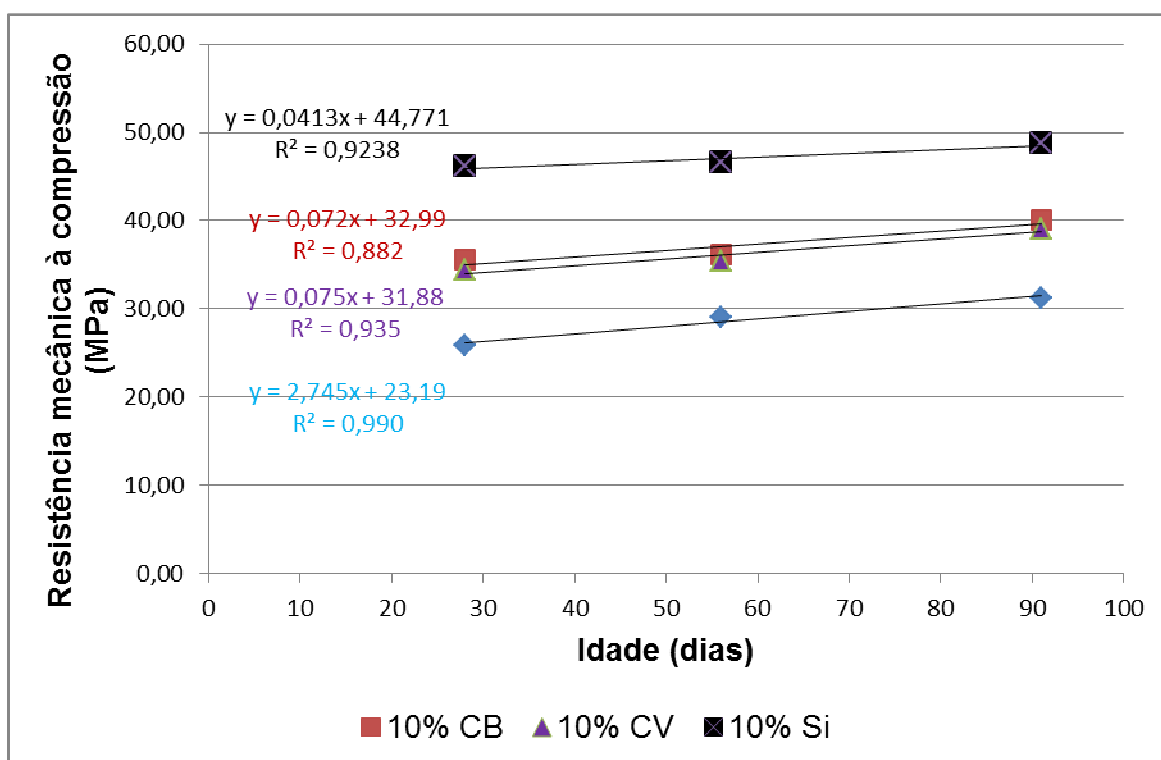


Figura 4.24 – Correlação linear entre resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias com o teor de 10% de adição para as argamassas.

O acréscimo da resistência da argamassa com cinza de folha de bananeira pode ter sido decorrente do menor tamanho médio das partículas da cinza de folha de bananeira (14,66  $\mu\text{m}$ ) em relação à cinza volante (29,33  $\mu\text{m}$ ), possibilitando desta forma se obter uma maior interação entre a cinza da folha de bananeira com o  $\text{Ca(OH)}_2$  oriundas das reações químicas do cimento.

Tomando como base os valores apresentados na Tabela 4.21, constata-se quanto à resistência à compressão das argamassas com 28 dias de idade:

- Que as argamassas contendo adição de materiais pozolânicos foram superiores a argamassa de referência, apresentando diferenças estatísticas significativas em relação a esta;
- Os valores mais baixos de resistência para todas as adições se deram para as argamassas produzidas com cinza volante;
- As argamassas produzidas com sílica ativa tiveram maiores valores comparados com as demais.

Quanto à resistência à compressão das argamassas aos 56 dias de idade:

- Os maiores valores de resistência à compressão foram determinados pelas argamassas com adição de sílica ativa;
- A argamassa de referência foi a que apresentou menor resistência quando comparada com as demais argamassas. Verifica-se pela Tabela 4.20 que o acréscimo de resistência no intervalo de 28 dias para 56 dias foi de apenas 3,21MPa;
- Fica evidente que a quantidade de  $\text{SiO}_2$  presente na sílica ativa teve influência significativa no aumento da resistência à compressão;
- Já para a cinza de folha de bananeira e cinza volante pouco se acresceu de resistência quando comparada com idades de 28 dias.

Quanto à resistência à compressão das argamassas aos 91 dias de idade:

- Embora a quantidade de  $\text{SiO}_2$  presente na cinza de folha de bananeira (48,7%) tenha sido 29,83% inferior à cinza volante (69,4%), esta apresentou maiores resistências mecânicas à compressão. Tal fator pode ser sido decorrente do seu grau de amorficidade bem como sua superfície específica da cinza de folha de bananeira terem sido 29,56% e 64,05% maiores que a cinza volante, apresentando desta forma maior quantidade de partículas



passíveis de reagirem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  originado pelo cimento Portland, gerando CSH.

- Os maiores acréscimos de resistência se deram na idade de 91 dias, fato qual pode ter sido decorrente da reação pozolânica se dar de forma lenta.

Na Tabela 4.24 está apresentada a classificação das argamassas segundo critérios da norma NBR 13279/05 para a idade de 28 dias.

Tabela 4.24 – Classificação da resistência à compressão das argamassas segundo a norma NBR13279/05

<b>Classe</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Argamassa 28 dias</b>
P1	$\leq 2$	-----
P2	1,50 a 3,0	-----
P3	2,50 a 4,50	-----
P4	4,0 a 6,50	-----
P5	5,50 a 9,0	-----
P6	$> 8,0$	Ref; 5%CB; 7,5%CB; 10%CB; 5%CV; 7,5%CV; 10%CV; 5%Si; 7,5%Si e 10%Si

#### 4.4.3 Massa específica no estado endurecido

O teste de massa específica das argamassas no estado endurecido foi efetuado aos 28 dias com amostras de (40 x 40 x 160) mm, conforme preconiza a norma NBR 13280/05. As medições dos corpos de prova e seus respectivos resultados estão apresentados na Tabela 4.25 e na Figura 4.25.

Tabela 4.25 – Valores de densidade de massa no estado endurecido

<b>Argamassa</b>	<b>Quantidade de corpos de prova</b>	<b>Soma</b>	<b>Média (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Variância</b>
Referência	3	5,56	1,85	0,000673
5% CB	3	5,71	1,90	0,000297
7,5% CB	3	5,69	1,89	0,000182
10% CB	3	5,80	1,93	0,00045
5% CV	3	5,66	1,88	0,000128
7,5% CV	3	5,68	1,89	0,000173
10%CV	3	5,67	1,89	0,000126
5% Si	3	5,72	1,90	0,000236
7,5% Si	3	5,59	1,86	0,00089
10% Si	3	5,78	1,92	0,002819

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.32, pode constatar que:

- A massa específica da argamassa de referência contendo cimento Portland do tipo CII – F32 é menor que a das argamassas contendo adições de materiais pozzolânicos;
- A massa específica da argamassa confeccionada com cinza de folha de bananeira para as adições de 5%, 7,5% e 10%, é significativamente maior que a das argamassas confeccionadas com cinza volante e sílica ativa, para a mesma proporção de adição, fato esperado, pois este material apresentou uma massa específica na ordem de 14,75% superior que a cinza volante e 9,84% que a sílica ativa;
- A massa específica da argamassa confeccionada com cinza de folha de bananeira com 5% de adição apresentou valores maiores que a cinza volante com adição de 5%, 7,5% e 10%.

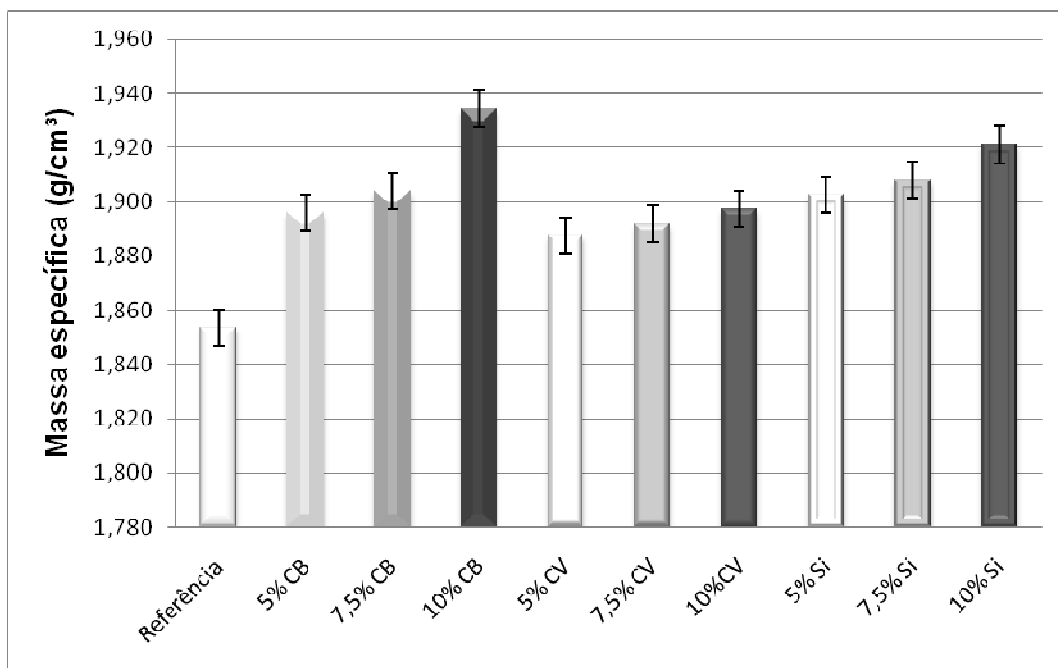


Figura 4.25 – Massa específica das argamassas no estado endurecido

Com base nos dados obtidos na Tabela 4.32 realizou-se uma análise de variância com o intuito de verificar se os valores de massa específica no estado endurecido para as diferentes argamassas foram, em média, diferentes, e seus dados estão apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas no estado endurecido

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	0,012253	9	0,001361	3,400098	0,010844	2,392814
<b>Dentro dos grupos</b>	0,008009	20	0,0004			
<b>Total</b>	0,020262	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Com um grau de confiança de 95% concluiu-se que existiram diferenças estatisticamente significativas de massa específica no estado endurecido entre as diferentes argamassas, uma vez que o valor  $P = 0,015598$  foi maior que o grau de significância de 0,05. Observando os valores de F e Fcrítico, notou-se que  $F > F_{\text{crítico}}$ , aceitando desta forma a hipótese de desigualdade e concluindo-se, assim, que existiram diferenças entre as massas específicas no estado endurecido das

argamassas. Analisando, separadamente, as porcentagens de adição de cada material pozolânico, notou-se, também, as diferenças significativas estatisticamente entre as massas específicas para as argamassas com adição de cinza de folha de bananeira nas proporções de 5%; 7,5% e 10%, como visto na Tabela 4.27 uma vez que o valor  $P = 0,038005$  foi menor que o grau de significância de 0,05.

Tabela 4.27 - Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de cinza de folha de bananeira

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,002496	2	0,001248	5,922905	0,038005	5,143253
Dentro dos grupos	0,001264	6	0,000211			
Total	0,00376	8				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Aplicando a análise estatística pelo método ANOVA notou-se que o valor  $P = 0,470974$  para a cinza volante foi maior que o grau de significância de 0,05. Observou-se na Tabela 4.28 que os valores de F foram menores que Fcrítico, aceitando desta forma a hipótese de igualdade entre os valores de 5%; 7,5% e 10% de adição de cinza volante nas argamassas estudadas.

Tabela 4.28 - Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de cinza volante

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000141	2	7,07E-05	0,855868	0,470974	5,143253
Dentro dos grupos	0,000496	6	8,26E-05			
Total	0,000637	8				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

As análises da massa específica no estado endurecido pelo método estatístico ANOVA para as argamassas com adição de sílica ativa em porcentagens de 5%; 7,5% e 10%, demonstraram que para um grau de significância de 95% o valor  $P = 0,013388$  foi menor que o grau de significância de 0,05, o que demonstrou uma desigualdade entre os valores de massa específica no estado endurecido para as adição de sílica ativa, como mostrado na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 - Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas com adição de sílica ativa

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,001663	2	0,000832	9,634218	0,013388	5,143253
Dentro dos grupos	0,000518	6	8,63E-05			
Total	0,002181	8				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Embora existam diferenças significativas estatisticamente entre as argamassas estudadas, estas foram classificadas, conforme prescrito na norma NBR 13280/05, como M5.

#### 4.4.4 Absorção de água por capilaridade

Os resultados das análises de absorção de água por um período de 10 e 90 minutos encontram-se apresentados nas Figuras 4.25 e 4.27 e o coeficiente de capilaridade na Figura 4.28.

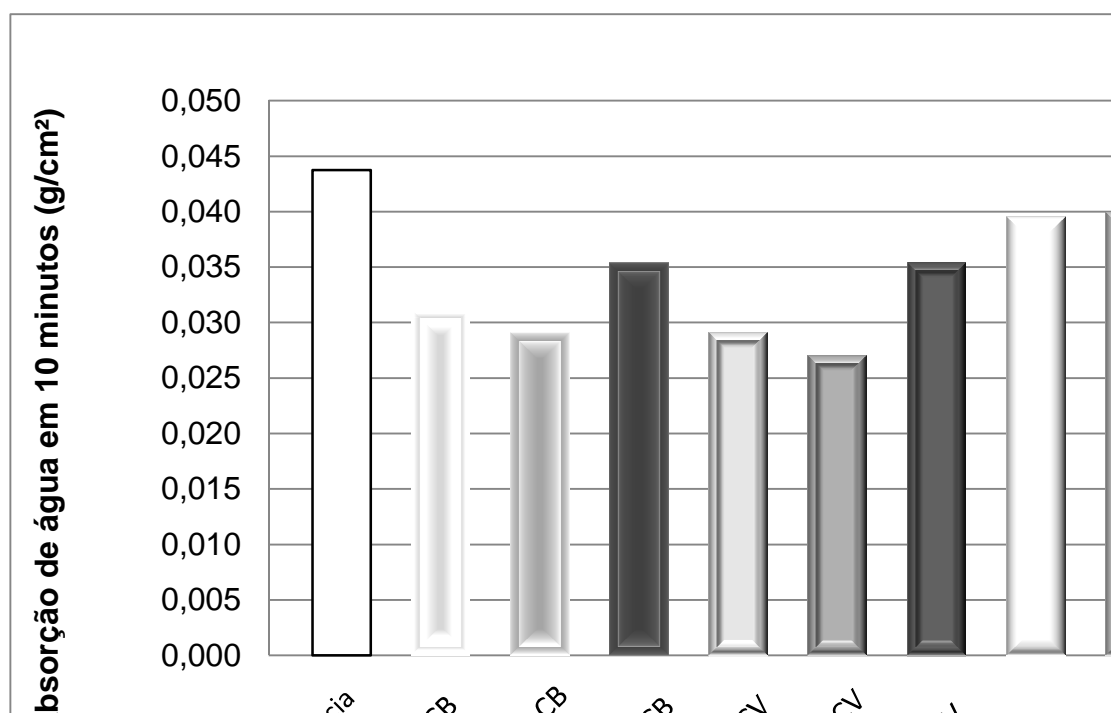


Figura 4.26 – Valores de absorção de água das argamassas por efeito capilar por 10 minutos

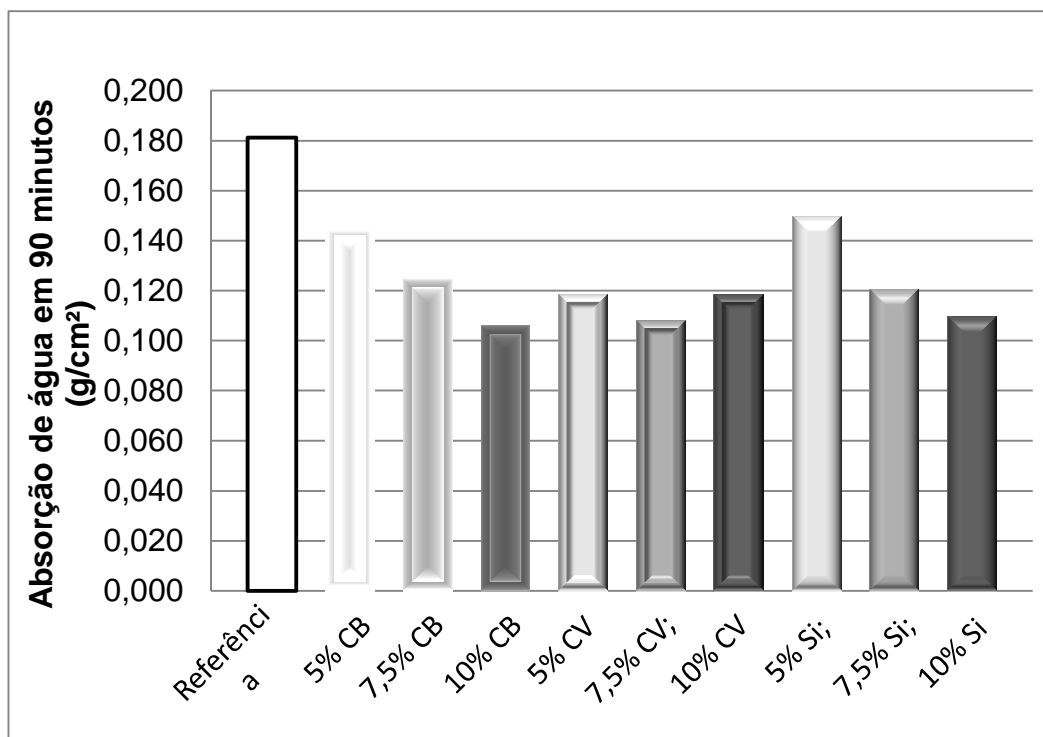


Figura 4.27 - Valores de absorção de água das argamassas por efeito capilar por 90 minutos

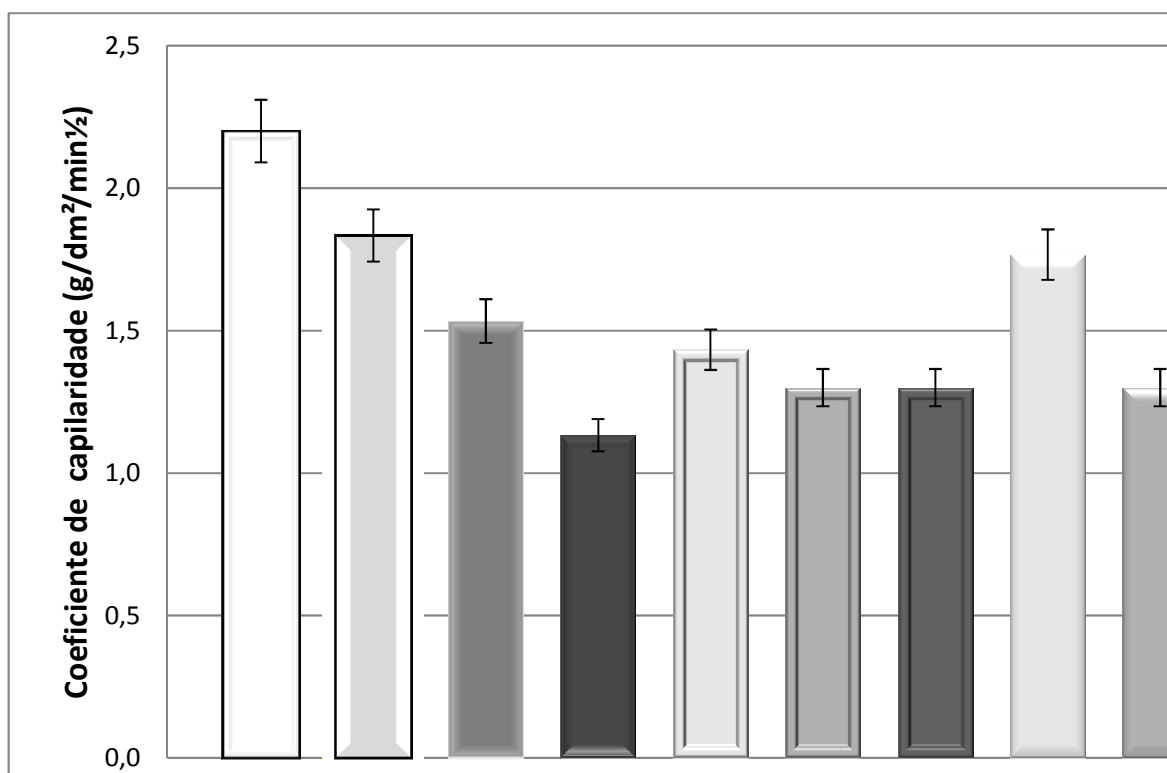


Figura 4.28 – Coeficiente de capilaridade das argamassas

Os resultados das Figuras 4.26 e 4.27 mostraram que à medida que os teores de adição de materiais pozolânicos aumentaram nas argamassas, a absorção de água por efeito capilar decresceu, devido a uma maior quantidade de materiais finos para um mesmo fator água/(cimento+adição). Na medida em que se aumentou a relação da quantidade de materiais finos, reduziu-se o coeficiente de capilaridade, provavelmente, devido à diminuição do raio dos capilares, tornando desta forma as argamassas mais impermeáveis que a argamassa de referência. Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas foram classificadas como classe do tipo C2, conforme mostrado na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 – Valores de coeficiente de capilaridade conforme NBR 13281/05

<b>Classe</b>	<b>Coeficiente de capilaridade</b>	<b>Classificação segundo NBR 13281/05</b>
C1	$\leq 1,50$	-----
C2	1,0 a 2,50	Referência; 5%CV; 7,5%CV, 10% CV; 5%CB; 7,5%CB; 10%CB; 5%Si; 7,5%Si e 10%Si
C3	2,0 a 4,0	-----
C4	3,0 a 7,0	-----
C5	5,0 a 12,0	-----
C6	$>10,0$	-----

#### 4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 4.29 pode-se observar as imagens do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os espectros obtidos da argamassa de referência. Observa-se a presença de poros, sendo um dos prováveis fatores de diminuição da resistência mecânica quando comparado com as argamassas com adição de materiais pozolânicos. A análise quantitativa dos espectros de EDS estão listados nas Tabelas 4.31 e 4.32.

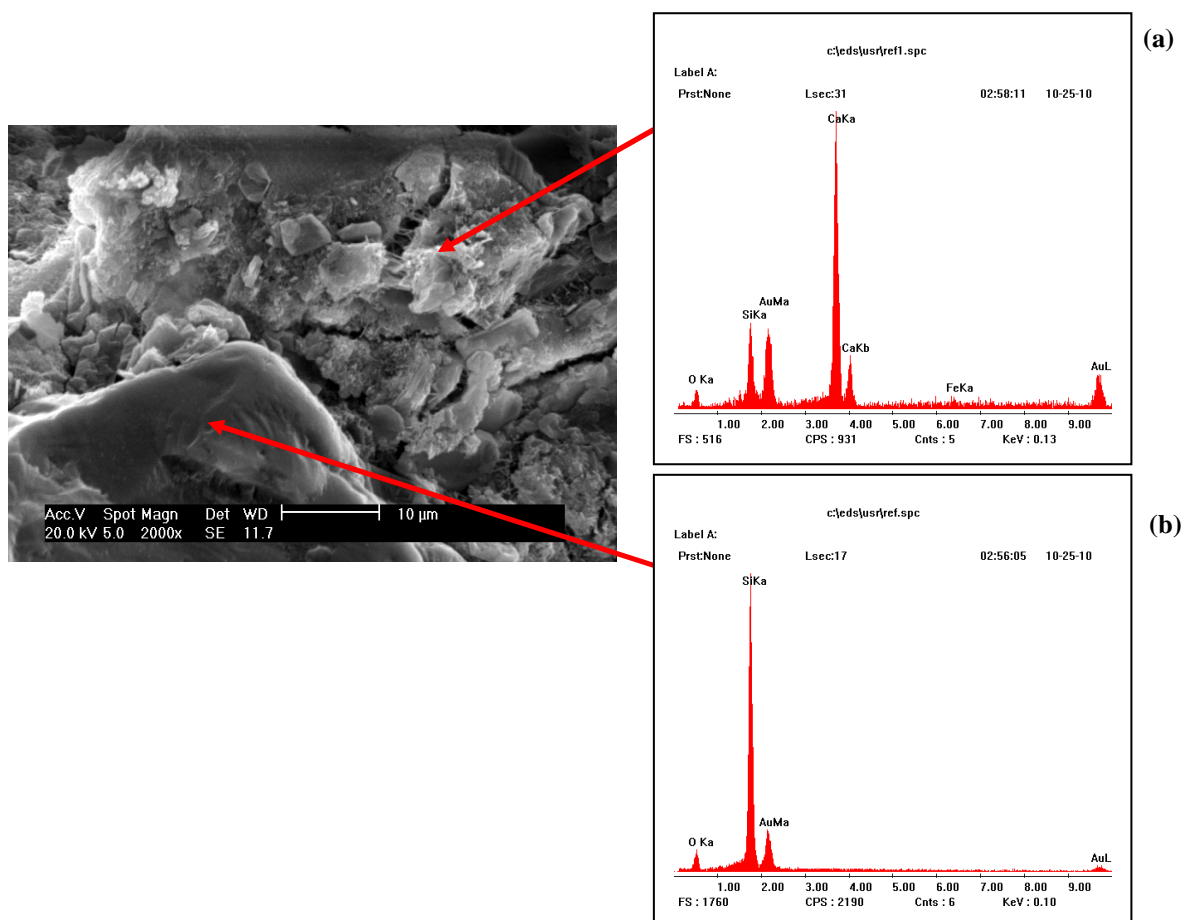


Figura 4.29 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa de referência aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas

Tabela 4.31 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
O K	0,0328	21,813	39,709
SiK	0,1124	11,195	11,609
CaK	0,8548	66,992	48,682
Total	1,0000	100,00	100,00

Tabela 4.32 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
O K	0,0799	25,369	37,373
SiK	0,9201	74,631	62,627
Total	1,0000	100,00	100,00

Conforme as análises dos espectros de EDS (Figura 4.29), que foram realizadas em alguns pontos da argamassa de referência, os elementos encontrados



em maior concentração no ponto (a) foram o cálcio (66,992%), o oxigênio (21,813%) e o silício (11,195%).

Já na região (b) os elementos em maior concentração foram o silício (62,627%) e o oxigênio (37,373%).

A Figura 4.30 apresenta a microscopia e os espectros obtidos da argamassa com adição de 10% de cinza volante (10%CV).

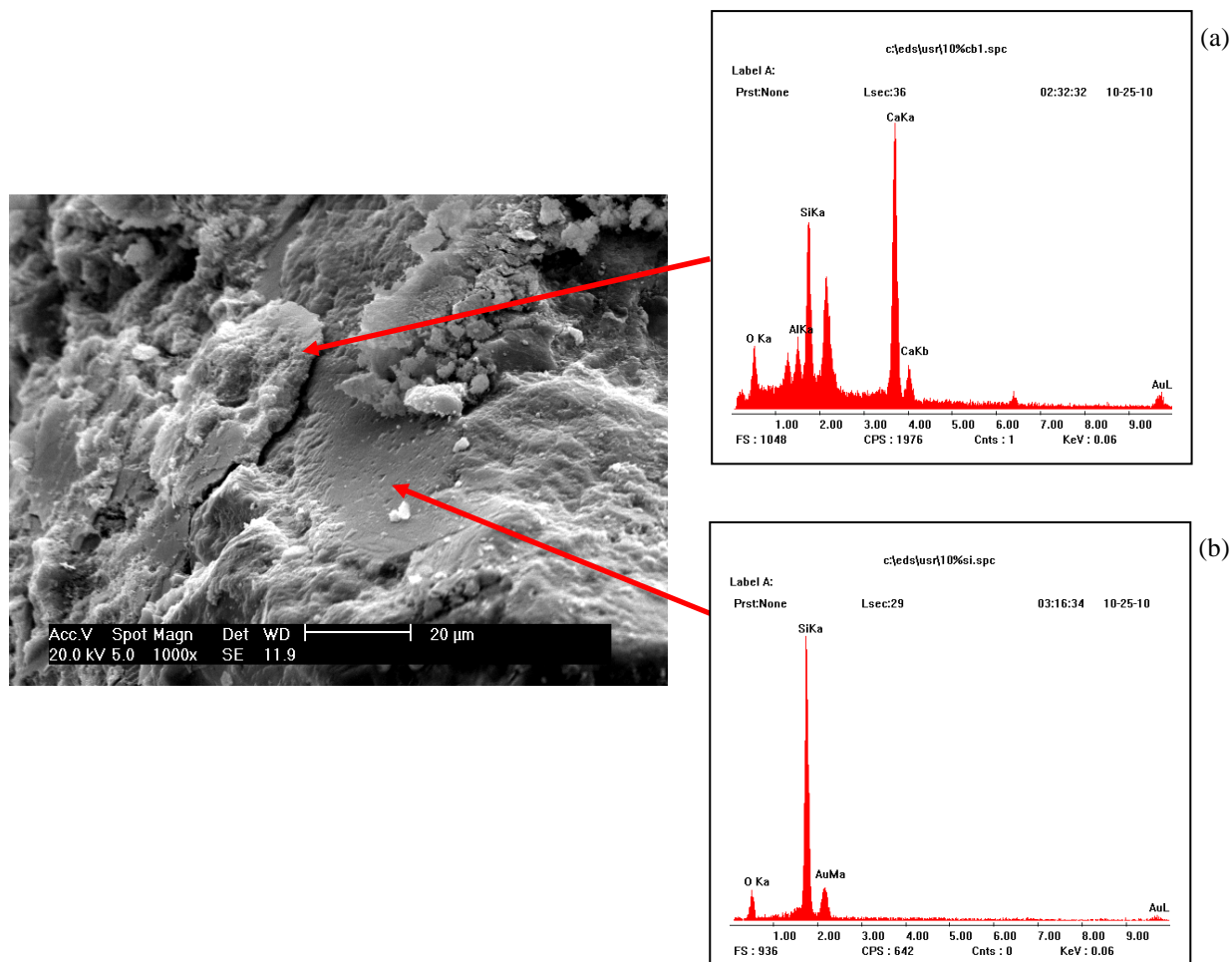


Figura 4.30 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de CV aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas

Na Figura 4.30 pode ser observado uma menor presença de poros quando comparados com a argamassa de referência, bem como gel de CSH.

SIQUEIRA (2011) estudou a reciclagem de resíduos a partir da cinza de carvão mineral na produção de argamassas. Na análise por Microscopia Eletrônica de Varredura verificou que a argamassa contendo cinza volante apresentou uma mistura

mais homogênea com pouca formação de poros, apresentando mesmo comportamento da cinza volante estudada neste trabalho.

O espectro da composição química elementar por EDS da região analisada está apresentado em conjunto.

A composição elementar semi-quantitativa em porcentagem em peso das regiões a e b estão apresentados nas Tabelas 4.33 e 4.34.

Tabela 4.33 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada

<b>Elemento</b>	<b>Razão K</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Porcentagem atômica (%)</b>
O K	0,0623	33,482	54,928
SiK	0,0598	5,4110	5,0570
CaK	0,8779	61,106	40,015
Total	1,0000	100,00	100,00

Tabela 4.34 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada

<b>Elemento</b>	<b>Razão K</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Porcentagem atômica (%)</b>
O K	0,0623	33,482	54,928
SiK	0,0598	5,4110	5,0570
CaK	0,8677	60,626	38,980
C K	0,0102	0,4800	1,0347
Total	1,0000	100,00	100,00

A composição química elementar semi-quantitativa, em porcentagem em peso da região (a) foi de: 33,482% de O; 5,411% de Si e 61,106% de Ca. Conforme as análises dos espectros de EDS (Figura 4.30), que foram realizadas na argamassa com 10% de cinza volante, os elementos encontrados em maior concentração no ponto (b) foram o cálcio (60,626%), o oxigênio (33,482%), o silício (5,4110%) e o carbono (0,48%).

Na Figura 4.31 está apresentada a micrografia obtida por microscopia e os espectros da argamassa com adição de 10% de cinza de folha de bananeira (10%CB).

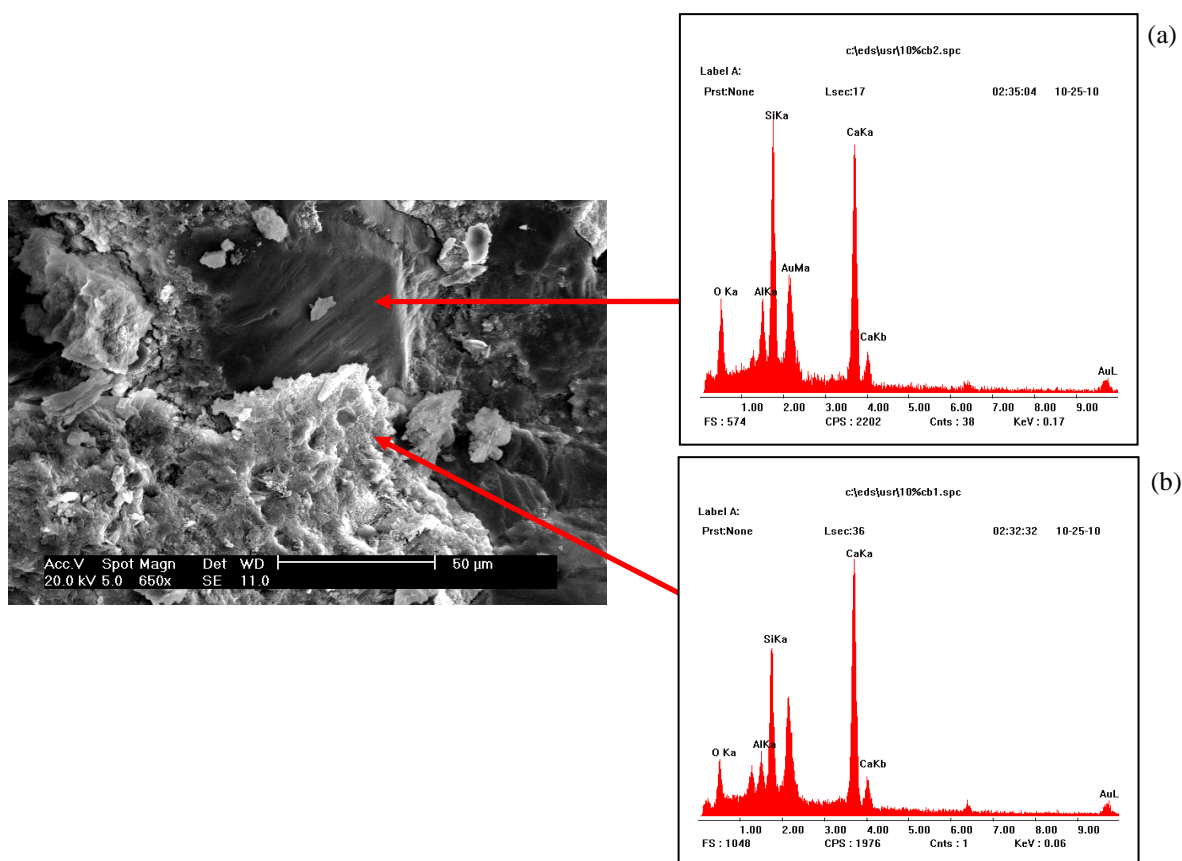


Figura 4.31 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de CB aos 56 dias e os espectros de EDS correspondentes as regiões analisadas

A análise micrográfica da superfície de fratura da argamassa com 10% de cinza de folha de bananeira mostra o gel de CSH, bem como o espectro da análise elemental por EDS da região analisada conforme mostrado na Figura 4.31. Verifica-se na micrografia que o rompimento se deu na pasta e não na interface de ligação entre pasta/agregado.

A composição elemental semiquantitativa, em porcentagem em peso da região (a), foi de: 36,43% de O; 5,649% de Al; 820,681% de Si e 37,24% de Ca. Esta composição química é típica de compostos do cimento, como os silicatos e aluminosilicatos. A composição elemental semi-quantitativa em porcentagem em peso das regiões a e b está apresentada nas Tabelas 4.35 e 4.36.

A composição química elemental semi-quantitativa, em porcentagem em peso da região (a), foi de: 36,43% de O; 5,649% de Al; 20,681% de Si e 37,24% de Ca, e no ponto (b) foi: 30,25% de O; 4,12% de Al; 16,28% de Si e 49,35% de Ca, ambas são típicas dos constituintes do cimento.

Tabela 4.35 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada

<b>Elemento</b>	<b>Razão K</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Porcentagem atômica (%)</b>
O K	0,0994	36,430	54,843
AlK	0,0581	5,649	5,043
SiK	0,2559	20,681	17,735
CaK	0,5866	37,240	22,379
Total	1,0000	100,00	100,00

Tabela 4.36 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (b) analisada

<b>Elemento</b>	<b>Razão K</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Porcentagem atômica (%)</b>
O K	0,0638	30,255	49,060
AlK	0,0371	4,123	3,964
SiK	0,1836	16,276	15,034
CaK	0,7155	49,347	31,942
Total	1,0000	100,00	100,00

Na Figura 4.32 está apresentada a composição química feita por EDS e a micrografia da superfície de fratura da argamassa, com adição de 10% de sílica (10%Si), feita por microscopia eletrônica de varredura. A análise micrográfica da sua superfície de fratura mostrou estar formada por uma estrutura densa, monolítica e com poucos poros, o que também foi observado por RAEDER FILHO (2005).

O espectro da análise elementar por EDS da região analisada conforme mostrado na Figura 4.32, apresentou uma composição de: 32,769% de O; 2,487% de Al; 50,515% de Si e 14,229% de Ca, como mostrado na Tabela 4.37.

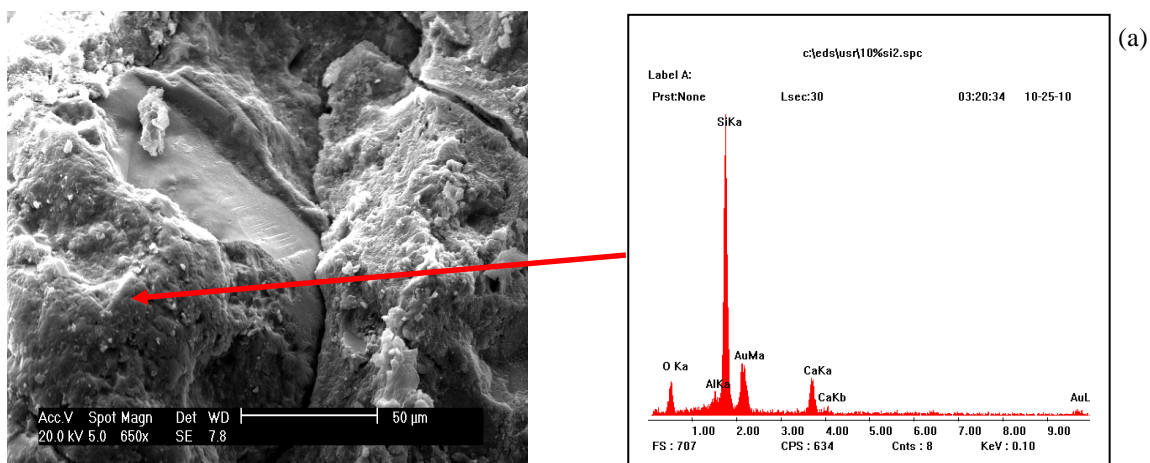


Figura 4.32 – Micrografia da superfície de fratura da argamassa com 10% de Si aos 56 dias e o espectro de EDS correspondente a região analisada.

Tabela 4.37 – Análise semi-quantitativa dos elementos presentes na região (a) analisada

Elemento	Razão K	Peso (%)	Porcentagem atômica (%)
O K	0,1072	32,769	47,699
AlK	0,0282	2,487	2,146
SiK	0,6659	50,515	41,886
CaK	0,1987	14,229	8,268
Total	1,0000	100,00	100,00

As micrografias analisadas indicaram que as argamassas confeccionadas com adição de materiais pozolânicos, como cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa, apresentaram comportamentos semelhantes, devido a maior formação de CSH que a argamassa de referência, acarretando assim no aumento da resistência mecânica, ao ataque de agentes agressivos como cloretos e sulfatos, absorção de água por efeito capilar e menor quantidade de ar incorporado.

#### 4.4.6 Resistência de aderência superficial

Os resultados de resistência média de aderência superficial de cada argamassa para as datas de 28, 56 e 91 dias, bem como o local de seus rompimentos encontram-se apresentados na Tabela 4.38.

Constatou-se que todas as argamassas apresentaram seu rompimento no substrato, sendo que os valores obtidos foram classificados como resistência dos blocos conforme descrito na norma NBR 13528/95. Tal fator pode ter sido decorrente da menor porosidade superficial do substrato devido à penetração de partículas de cimento do chapisco para o interior dos blocos por efeito capilar.

O chapisco, além de criar uma ponte de aderência entre a argamassa e o substrato, cria uma maior área de contato para que as argamassas de emboço tenham melhor aderência, acarretando desta forma no rompimento dos blocos cerâmicos, como visto na Figura 4.33.

Tabela 4.38 – Resistência média de aderência das argamassas

<b>Argamassa</b>	Resistência Média 28 dias	Local de Ruptura	Resistência Média 56 dias	Local de Ruptura	Resistência Média 91 dias	Local de Ruptura
Referência	0,184	Substrato	0,241	Substrato	0,310	Substrato
5% CB	0,209	Substrato	0,304	Substrato	0,334	Substrato
7,5% CB	0,202	Substrato	0,322	Substrato	0,293	Substrato
10% CB	0,173	Substrato	0,223	Substrato	0,272	Substrato
5% CV	0,208	Substrato	0,313	Substrato	0,333	Substrato
7,5% CV	0,160	Substrato	0,214	Substrato	0,281	Substrato
10% CV	0,149	Substrato	0,293	Substrato	0,342	Substrato
5% Si	0,223	Substrato	0,269	Substrato	0,298	Substrato
7,5% Si	0,211	Substrato	0,166	Substrato	0,308	Substrato
10% Si	0,168	Substrato	0,245	Substrato	0,238	Substrato



Figura 4.33 – Rompimento da argamassa no substrato

Embora as argamassas tenham apresentado resistência superior ao substrato, verificou-se que estas não demonstraram o aparecimento de fissuras por retração, o que foi dificultado pelo fato das pozolanas terem propiciado a segmentação dos vasos capilares pelo efeito microfiller, em consequência disso um aumento da estanqueidade das argamassas e a redução da evaporação excessiva de água para o meio ambiente e sua perda para o substrato, fator qual também foi observado por CARNEIRO (1999) no estudo da Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. Embora todas as argamassas tenham apresentado seu rompimento no substrato, notou-se na Tabela 4.38 que os valores de resistência para as adições de 10% CB; 10% CV e 10% Si foram inferiores às outras adições, o que pode ter sido decorrente das reações pozolânicas em maior quantidade que as demais adições.

#### 4.4.7 Classificação das argamassas segundo a norma NBR13281/05

A Tabela 4.39 apresenta a classificação geral das argamassas avaliadas segundo os requisitos da NBR 13281/2005.

Tabela 4.39 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281/05

<b>Argamassa</b>	<b>Classificação</b>
<b>Ref</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U2
<b>5%CB</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U3
<b>7,5%CB</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U3
<b>10%CB</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U4
<b>5%CV</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U2
<b>7,5%CV</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U4
<b>10%CV</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U4
<b>5%Si</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U4
<b>7,5%Si</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U4
<b>10%Si</b>	P6, M5, R6, C2, D5, U5

Nota-se na Tabela 4.39 que o único quesito estipulado pela norma NBR13281/05 em que as argamassas não foram classificadas foi resistência

potencial de aderência à tração (A). Tal fator foi devido aos rompimentos dos ensaios de terem ocorrido em sua totalidade no substrato onde as argamassas foram aplicadas. Embora os resultados de resistência não tenham sido efetivamente das argamassas, nota-se que em sua grande maioria os valores de resistência foram  $\geq 0,30\text{MPa}$ , pertencente à classe 3. No restante dos outros quesitos, exceto à retenção de água (U), as argamassas avaliadas apresentaram-se semelhantes, demonstrando desempenhos parecidos.



## 5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento dos experimentos possibilitou obter resultados condizentes com os objetivos propostos. A utilização de materiais com atividade pozolânica como a cinza de folha de bananeira, a cinza volante e a sílica ativa em argamassas de cimento Portland apresentaram benefícios no que diz respeito às suas características no estado fresco e, principalmente, no comportamento mecânico no estado endurecido.

Algumas diferenças nas propriedades das argamassas ocorreram em função do tipo de material pozolânico utilizado, embora os seus benefícios sejam em geral semelhantes como destacado:

- a cinza de folha de bananeira, a cinza volante e a sílica, apresentaram atividade pozolânica com limites iguais ou superiores aos estipulados pela norma NBR5751/92 e por RAVERTY *et al.* (1980) para o ensaio de Chapelle;
- as argamassas apresentaram redução da permeabilidade e consequentemente melhora da durabilidade em relação à argamassa de referência;
- a adição de pozolanas aumentou a retenção de água em função do efeito “microfiller” gerado pelas pozolanas;
- houve redução da consistência com o aumento da porcentagem de adição de cinza, podendo prejudicar a sua trabalhabilidade, fator corrigido com o emprego de aditivo plastificante, ficando dentro dos parâmetros solicitados em norma;
- as resistências mecânicas à compressão das argamassas com adição de materiais pozolânicos foram superiores à da argamassa de referência em idades mais avançadas, em função da diminuição dos poros da pasta hidratada e pela interação entre as pozolanas e o  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado pelo cimento Portland, gerando assim CSH;
- o ensaio de resistência à aderência superficial em paredes demonstrou que todas as argamassas apresentam resistências superiores às do substrato;
- as argamassas com adição de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa apresentaram classificações semelhantes conforme a norma NBR13281/05, diferenciando-se somente no ensaio de retenção de água.
- os resultados do emprego da cinza de folha de bananeira em argamassas de cimento Portland demonstraram benefícios quanto ao aumento de resistência

mecânica à compressão e à tração, quando comparada com a argamassa de referência e a argamassa com cinza volante;

- os teores de adição de cinza de folha de bananeira apresentaram acréscimo de resistência significativo com 91 dias de idade.

- sabendo-se que durante o crescimento das bananeiras, as folhas velhas e secas são cortadas e descartadas ao longo do bananal, a sua queima para geração de um material pozolânico atendem aos quesitos de sustentabilidade uma vez que os pés de banana produzem apenas um cacho do fruto ao longo de sua vida sendo estes cortados após a produção do mesmo.

- não se tem parâmetros relativos à redução de custos durante a produção da cinza de folha de bananeira, uma vez que o estudo em questão procurou avaliar as propriedades e características da cinza de folha de bananeira em relação a uma argamassa de referência e comparativamente às argamassas com materiais pozolânicos conhecidos nas literaturas, como a cinza volante e sílica ativa.

Conclui-se desta forma que a cinza da folha de bananeira quando adicionada em argamassas de cimento Portland apresenta desempenho mecânico superior à argamassa de referência e argamassa com adição de cinza volante, porém inferior a argamassa com adição de sílica ativa.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O referido trabalho teve como foco principal avaliar o comportamento de argamassas no estado fresco e endurecido contendo até 10% de adição de cinza de folha de bananeira; cinza volante e sílica ativa frente a uma argamassa sem adição.

São necessários estudos mais detalhados sobre a influência da adição de porcentagens maiores das cinzas estudadas tanto em cimentos, concretos, argamassas mistas (cimento + cal) e argamassas de cimento, tendo como base avaliar as suas características no estado fresco e endurecido.

Faz-se necessário a avaliação da utilização de novos aditivos do tipo plastificantes e superplastificantes, a fim de verificar o comportamento da cinza quando em contato com os mesmos.

Pode-se, também, verificar a influência do emprego de agregados britados em concretos e argamassas contendo cinza de folha de bananeira, nas propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Enfim, pode-se estender a pesquisa para a otimização do forno desenvolvimento por Kanning (2010) que propicie melhor queima da cinza de folha de bananeira, podendo desta forma reduzir a quantidade de material não totalmente calcinado como observado neste estudo.

## REFERÊNCIAS

ACI. ***State-of-the-art report on high-strength concrete***. ACI 363 R- Detroit, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 618/2005**. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM, 2005.

ANICER. Associação Nacional da Indústria da Cerâmica. Disponível em: <http://www.anicer.com.br/index.asp?pg=institucional.asp&secao=3&categoria=60&subcategoria=0> Acesso em 17 de outubro de 2011.

ARAUJO, A. S. de. **Determinação de estruturas moleculares cristalinas por difração de Raios X e desenvolvimento de um sistema computacional para a comparação de fragmentos moleculares de configuração similar**. Dissertação de mestrado. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

ARAÚJO, J., MORAIS, A. O., COSTA, E. B. C., GEYER, A. **Análise da Influência de Diferentes Tipos de Sílica Ativa na Produção de Concretos de Alto Desempenho**. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751/92**. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752/92**. Pozolanas – Determinação de atividade pozolânica com o cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467/87**. Determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200/98**. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimentos. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214/84**. Areia normal para teste de cimento. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215/96**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**. Cimento Portland – Determinação da específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**. Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216/82**. Amostragem de Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217/82**. Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218/87**. Determinação do Teor de Argila em Torrões nos Agregados. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219/82**. Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7220/87**. Determinação de Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251/82**. Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202/85**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,077 mm (nº 325) – Método de teste. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9941/87**. Redução de Amostra de Campo de Agregados para Teste de Laboratório. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776/87**. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9777/87**. Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653/92**. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13259/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281/05**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529/95**. Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749/96**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificações. Rio de Janeiro, 1996.

ABCP – **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ª edição. São Paulo, 2002. (BT-106).

ABANORTE. Disponível em:

<<http://www.abanorte.com.br/producao/abanorte/fruticultura/banana>> Acesso em 03 de agosto de 2010.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: O uso de fibras vegetais**. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1991. 204 p.

AITCIN, P. C. - **Concreto de Alto Desempenho**. 1<sup>a</sup> edição São Paulo: Ed. PINI, 2000. 667 p.

ALMEIDA, A. E. F. de S. **Estudo da influência das adições de Sílica Ativa e Copolímero Estireno Acrílico nas propriedades de argamassas para assentamento de Porcelanato**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. São Carlos, 2005.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concreto de alto desempenho**. Santa Maria, 2000. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

ALVES, R. A. R. **Contribuição ao estudo dos aditivos superfluidificantes utilizados em concreto fluido**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1994. 176p.

ALVES, J. D. **Materiais de Construção**. Volume 1. Editora Nobel. São Paulo, 1980. 327p.

AMORIM, L. V.; PEREIRA, A. S. G.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, p.222-228. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 1999.

AMORIN, C. L. G. **Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios X**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 128p.

ANJOS, R. R. dos, ISMAEL, M. R., RAMAL, F. T., PANDOLFELLI, V. C. **Microsilica addition and the drying of refractory castables**. Revista Cerâmica 50, 2004. pg 331 – 335.



ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V.; PILEGGI, R. G. **Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliada por *squeeze-flow***. VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2005. 162p.

ASTM – C 157-80 ***Length change of hardened cement mortar and concrete***.

BANFILL, P. F. G. ***The rheology of fresh mortar. A review***. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. I Internacional Symposium on Mortars Technology. VI SBTA. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005. p 73-82.

BASTOS, P. K. X.; NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Comparação da retração de argamassas industrializadas e mistas de revestimento nos estados fresco e endurecido**. VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 2001, p.172. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

BELMONTE, E. dos P. **Espectrometria por fluorescência de raios-X por reflexão total: Um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo**. Tese (Doutorado). Pós-graduação em Ciências em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2005. 164p.

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J.; PILEGGI, R. G. **Caracterização reológica de pasta cimentícia: Associação de técnicas complementares**. Ambiente Construído. Vol. 9. n4. Porto Alegre, outubro/dezembro, 2009.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-X em cristais**. Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2000. 20p.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza de casca de arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PR, 2010.

BONNEAU, O.; VERNET, C.; MORANVILLE, M.; AITCIN, P. C. ***Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete***. Cement and Concrete Research. Vol. 30, pg. 1861-1867. 2000.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. da S. S. **O cultivo da bananeira**. EMBRAPA. Bahia. Cruz das Almas, 2004. 279p.

CALZA, C. **Fluorescência de raios X aplicada à análise de bens culturais**. Boletim Eletrônico da ABRACOR. Nº 1. Junho de 2010.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto**. Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. São Paulo, 1987. 17 p.

CAMPITELI, V. C.; MASSARETTO, R.; RODRIGUES, P. T. **Dosagem experimental de argamassas mistas a partir de cal virgem moída**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I., 1995, Goiânia. Goiânia: ANTAC, 1995, p. 73-82.

CAPOZZI, S. **Fachada paulistana**. Construção. Volume 49. n.2540, p18-19. São Paulo, 1996.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**.

São Paulo, 1999. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze-flow*.** VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. I Internacional Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

CARDOSO, F. A.; AGOPYAN, C.; CARBONE, V. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Caracterização reológica de argamassas à base de gesso por *squeeze-flow*.** 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15 a 19 de maio de 2006.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. ***Squeeze-flow* aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/545. ISSN 0103-9830. São Paulo, 2010.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com Sílica Ativa e Metacaulim face a resistência mecânica e a viabilidade econômica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. UFPR. Curitiba, 2006. 136p.

CASIMIR, C. ***Testing, evaluation and diagnostics.*** Anais do International Conference On Building Envelope Systems And Technology. Singapore, 1994.

CAVACO, L. S. R. G. **Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho.** Dissertação para a obtenção do

grau de Mestre em Construção. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. Março de 2005.

CAVANI, G. R.; ANTUNES; R. P. N.; JOHN; V. M. **Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade de argamassas mistas**. Anais do II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, ANTAC, Salvador, 1997. p. 110-119.

CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de Ativação dos Concretos Experimentação e Modelagem**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2002. 134 p.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método Squeeze-Flow**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005. 23p.

CEAGESP. Disponível em:

<[http://www.ceagesp.gov.br/produtor/estudos/artigos/artigo\\_070410](http://www.ceagesp.gov.br/produtor/estudos/artigos/artigo_070410)> Acesso em: 03 de agosto de 2010.

CERÍACO CRUZ, N. T. C. **Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, Lisboa, 2008.

CIMENTO.ORG. Disponível em: < <http://www.cimento.org/> > Acesso em: 13 de outubro de 2008.

CINCOTTO, M. A. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. In. **Tecnologia das Edificações**. São Paulo: Pini/IPT, 1988.

CINCOTTO, M. A.; MARQUES, J. C.; HELENE, P. R. L. **Propriedades das argamassas cimento: cal: areia**. Seminário sobre Argamassas. São Paulo, jul. 22-26. Instituto Brasileiro de Concreto. IBRACON. São Paulo, 1985.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de teste**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. **Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica**. Tecnologia das Edificações. São Paulo: 1988. IPT-PINI.

CYR, M., LAWRENCE, P., RINGOT, E. ***Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength***. Cement and Concrete Research. V. 36, pg 264- 277. 2006.

COIMBRA, M. A.; SANTOS, W. N. dos; MORELLI, M. R. ***Recovery of inorganic waste for civil construction***. Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. Cerâmica 48 (306) Abr/Mai/Jun 2002. pg 44 - 48.

CORDEIRO, G. C.; TOLERO FILHO, R. D.; TABARES, L. M; FAIRBAIRN, E. de M. R. ***Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete***. Cement and Concrete Research 39, 2009. p 110 – 115.

CORINALDESI, V.; GIUGGIOLINI, M.; MORICONI, G.; ***Use of rubble from building demolition in mortars***. Waste Management magazine, n.º. 22, 2000.

COSTA, M. do R. de M. M. da. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Urbana. São Paulo, 2006. 131pg.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento reológico**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. I Internacional Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 23 à 25 de maio de 2005.

CULLITY, B. D. ***Elements of X-ray Diffraction***. Second edition. United States of America, Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1978.

ÇOLAK, A. ***Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan***. Cement and Concrete Research 33 (2003), p. 585-593.

DAL MOLIN, D. C. C. ***Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de Microssílica***. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1995. 286p.

DAL MOLIN, D. C. C. ***Adições minerais ao concreto estrutural***. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. ***Adições minerais para concreto***. In: Concreto: ensino, pesquisas e realizações/ editor Geraldo Cechella Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v.

DEARLY, J.; WISSBRUN, K. F. ***Melt Rheology and its Role in Plastics Processing: Theory and applications***. Van Nostrand Reinhold. New York, 1999.

EMBRAPA. Disponível em:

**<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananaJuazeiro/plantio.htm>>** Acesso em 23 de abril de 2012.

BAUER, L. A. F. ***Materiais de Construção 2***. 5<sup>a</sup> Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 1994.

FARIA, E. F. de. ***Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados***. Tese (Doutorado).. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2004. 130 p

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP/CIESP. ***Ampliação da oferta***

**de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar).** São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. 90p.

FERNÁNDEZ, L. M., PUCHOL, R. Q., **HERNÁNDEZ, J. F. M. Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante.** Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 N<sup>o</sup>2, Agosto de 2007. pg 113 – 122.

FRÍAS, M., RODRÍGUEZ, A., VALDAZO, J. **Estudios para el aprovechamiento de subproductos procedentes del proceso de fabricación de papel a partir de papel usado en la industria cementera.** Cemento y Hormigón 898, 4–10. 2007.

FREITAS JÚNIOR., J. de A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil – PPGCC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. 131 p.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; CASALI, J. M. **Comparação entre diferentes metodologias utilizadas no Brasil para avaliação da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz.** 5<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Cimento (CBC). São Paulo, 1999. 13 p.

GEYER, A.L.B.; MOLIN, D.D.; CONSOLI, N.C. **Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as a addition in concrete. In: International Conference on Sustainable Construction Into The Next Millennium.** Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa, 2000. Proceedings... João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. p. 464-473.

GOBBO, L. A. **Os compostos do Clínquer Portland: Sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003. 157 p.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: Um novo material para dosagens estruturais.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001. 148p.

GONÇALVES, J. P.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Penetração de água em argamassas de argila calcinada-cimento Portlando.** SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 11 à 13 de junho de 2003.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. 318p.

HOLLAND, T. C. **Silica Fume User's Manual.** Lovettsville: Silica Fume Association, 2005. Report No. FHTWA-IF-05-016.

IAPAR. Disponível em <<http://www.pr.gov.br/cadeias/banana.html>>. Acesso em: 03 de julho de 2008.

ISAIA, G. C. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais.** Vol. 1. ed. G. C. Isaia. São Paulo, IBRACON, 2007. p 772-779.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Efeitos de altos teores de pozolanas em concreto de elevado desempenho sob a ação de cloretos.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1995. 20 p.



ISMAIL, M. ***Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour Prolonger la duree de service des Infrastructures (ponts, centrales nucleaires)***. Toulouse, França, 2006, 234 p. Tese (Doutorado) – Institut National des Sciences Appliquées.

JOHN, W. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil - Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento**. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 102p. São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. da. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. In: Tecnologias e materiais alternativos de construção / Wesley Jorge Freire, Antônio Ludovico Beraldo. Ed. da UNICAMP. São Paulo, Campinas, 2003. p 140 – 190.

JOUKOSKI, A. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

KAZMIERCZAK, C. S. **Apostila de Materiais de Construção Civil II**. Curso de Engenharia Civil. UNISINOS. Rio Grande do Sul, 2004.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; COSTA, M. R. M. M.; PUPPI, R. F. K. ***Evaluation of Pozzolanic Activity of Banana Leaf Ash***. XII DBMC. International Conference on Durability of Building Material and Components. Porto, Portugal, 12 à 15 de abril de 2010.

KANNING, R. C. **Avaliação do potencial pozolânico da cinza de folha de bananeira**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 69p.

KHATIB, J. M.; WILD, S. ***Pore size distribution of metakaolin past***. Cement and Concret Research, v. 26. P. 1545-1553, 1996.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. Vol. 1. São Paulo, IBRACON, 2005. p 295-322.

KILINÇKALE, F. M. ***The effect of  $MgSO_4$  and HCL Solutions on the Strength and Durability of Pozzolan Cement Mortars***. Cement and Concrete Research, vol. 27. N° 12. pp. 1911-1918. 1997.

KOLENDA F.; RENATA, P.; RACINEUX, G.; POITOU, A. ***Identification of rheological parameters by the squeezing test***. Powder Technology. v130. 2003. P56-62.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. R. L. **Estudo da influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. ISSN 0103-9803. BT/PCC/419. São Paulo, 2005.

LARA, D.; NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, E. **Dosagem das argamassas**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I. Goiânia: ANTAC, 1995. p. 63-72.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. ***Mineral admixtures en mortars: effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength***. Cement and Concrete Research. V. 35. pg 1092-1105. 2005.

LEA, F. M. ***The Chemistry of Cement and Concrete***. Third Edition. Chemica Publishing Company Inc., 1971, 727p.

LEITE, M. B. MOLIN, D. D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D**. Sitientibus, 26, Feira de Santana, 2002.

LEVY, S., HELENE, P. ***Durability of concrete mixed with fine recycled aggregates***. São Paulo, vol. 5., n.1. Janeiro/junho, 2007. p 25-34.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A.; CAMPOS, M. de F. **Pozolanicidade e resistência mecânica de argamassas confeccionadas com cinza da casca da castanha de caju**. Revista e Tecnologia Minerva, 2008. p 249 – 256.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções: procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações**. São Paulo, 1986. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos**. São Paulo, 1998.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P.K. ***Pozzolanic and cementitious materials***. Advances in concrete technology Program, CANMET:volume 1, 1996.

MANNAN, M. A.; GANAPATHY, C. ***Concrete from an agricultural waste oil-palm shell*** (OPS). Building & Environment. V. 39, pg 441-448. 2004.

MANICA, I. **Fruticultura tropical 4**, Banana. Porto Alegre: Cinco Continentes, 1997. 485p.

MARGON, P.; ROCHA, J. (a) **Argamassas com cinzas de carvão mineral dosadas por curva granulométrica**. V SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 11 à 13 de junho de 2003.

MARGON, P.; ROCHA, J. (b) **Argamassas dosadas com cinzas de carvão mineral de termelétrica**. V SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 11 à 13 de junho de 2003.

MATTOS, L. R. S. de, DAL MOLIN, D. C. C.; CARNEIRO, A. M. P. **Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA (Brasil): estudo do comportamento no estado fresco**. Engenharia Civil. UM. nº 5. 2002. PP. 63-74.

MEETEN, G. H. **Effects of plate roughness in squeeze-flow rheometry**. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 2004. P 51-60.

MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Advances in Concrete Technology. MALHOTRA, V. M. Ed. CANMET. Vol. 1. Ottawa, 1996. p 7-24.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. - **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. Pini. São Paulo, 1994.

MEHTA, P. K. RAMACHANDRAN, V.S. **Mineral Admixtures**. In: *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. Noyes publications: Park ridge, 1984.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. - **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. IBRACON. São Paulo, 2008.

MELO, R. C. N. **Células & Microscopia: princípios básicos e práticas**. Juiz de Fora: Ed. UFJF, 144p. 2002.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S. NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas**. Revista Cerâmica. vol. 55 n335. São Paulo julho/setembro de 2009.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. PPGCC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002. 146p.

MICHELLE, S. R.; BERALDO, A. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual.** Revista Engenharia Agrícola. vol. 30. n2. Jaboticabal março/abril 2010. ISSN 0100-0616.

MICHLER, G. H. **Scanning Electron Microscopy.** In: Electron Microscopy of Polymers, Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, 88–120.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. **Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze-flow.** Journal of materials science. v29. 1994. p 1374-1381.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimento de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 172 p.

MIRANDA, V. M. C. **Análise da aderência de soluções de reboco tradicional sobre suportes de betão.** Dissertação de Mestrado em Construção. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Maio de 2004.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. **Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri, SP.** Revista do Instituto Geológico. São Paulo, 23(1), 13-24, 2002.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. SANT'AGOSTINO, L. M., SAITO, M. M. **Terras diatomáceas: uma pozolana natural na bacia do Paraná, estado de São Paulo.** Revista do Instituto Geológico. São Paulo, 23(2), 1-17, 2002.

MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. **Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: Difractometria de raios X como método alternativo.** Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 24(1/2), 1-9, 2003.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. **Serral Geral Formation – São Paulo State, Brazil: a potencial source for natural pozzolans.** Material Letters 58 (2004) p. 876-881.

MONTEIRO, P. J. **Microstructure of concreto and its influence on the mechanical properties.** Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1985, 153p. (ph.D. Thesis).

MORAES, M. F. de, TEZUKA, Y. **Uma abordagem sobre o estudo da arte da Microssílica.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. ISSN 0103-9830. São Paulo, 1992.

MORAES, R. da. C. **Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PPGEC. Santa Maria, 2001.

MORAES, L. M. B. de. **Utilização da técnica de fluorescência de raios X por dispersão em energia (EDXRF) na avaliação do material particulado em suspensão na cidade de Limeira-SP.** Tese (Doutorado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo. Piracicaba, 2009.

MOHAMAD, G.; NETO, A. B. da S. S.; PELISSER, F.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. **Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – previsão e modo de ruptura.** Revista Matéria. v.14, n.2, PP. 824-844. ISSN-1517-7076. 2009

NASCIMENTO, O. L. **Melhorias técnicas em concretagens.** Sinduscon – Minas Gerais, março de 2007.

NAWY, E. G. **Fundamentals of high strength high performance concrete.** UK: Longman; 1996.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 1ª edição. Editora PINI Ltda. São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição, Editora PINI Ltda. São Paulo, 1997.

NETO, G. T. B. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. UFPR. Curitiba, 2006. 169p.

NETTO, R. M.; FIGUEIREDO, D. L. M. **Materiais Pozolânicos**. Curso de Especialização em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006. 148p.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. Dissertação. Escola Politécnica da USP. Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2006.

NITA, C. JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o Metacaulim e a Sílica ativa**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. ISSN 0103-9830. BT/PCC/451. São Paulo, 2007.

NOKHODCHI. A. ***An averview of the effect of moisture on compaction and compression***. Phamaceutical Technology. January, 2005. P 46-56.

OLAWUYI, B. J., OLUSOLA, K. O. ***Compressive Strength of Volcanic Ash/Ordinary Portland Cement Laterized Concrete***. Civil Engineering Dimension, Vol. 12, No. 1, March, 2010. ISSN 1410-9530 print/ISSN 1979-570X online. pg 23 – 28.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, 2000. 195p.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

OLIVEIRA, M. P. de. NÓBREGA, A. F. da, DI CAMPOS, M. S. BARBOSA, N. P. **Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland.** Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social. Brasil-NOCMAT 2004. São Paulo, Pirassununga, 2004.

OLIVEIRA, K. M. G. **Estudos de difração de raios-x a alta resolução da Beta-Lactoglobulina Bovina.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física “Gleb Wataghin”. UNICAMP. São Paulo. Campinas, 1999. 80p.

PAULA, M. O. de. **Potencial da cinza de bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Minas Gerais, Viçosa, 2006. 60 p.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. **Potencial da cinza de bagaço da cana-de-açúcar como potencial de substituição parcial do cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Volume 13, n.3. Campina Grande, PB, 2009. p.353-357.

PEREIRA, V. M.; CARVALHO, E. BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. **Análise fluido-dinâmica do escoamento em teste de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com cimento Portland de alto-forno.** *Cerâmica*, Jun 2008, vol.54, no.330, p.160-166. ISSN 0366-6913.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland.** 13ª Edição. Revisado por PAULON, V. A. Editora Globo. São Paulo, 1998.



PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas**. Revista de ciência e tecnologia de materiais de construção civil. vol. 3. n2. Novembro, 2006. P 62-76.

PILEGGI, R. G. PANDOLFELLI, V. C. **Reometria de concretos: Uma realidade brasileira para uma proposta internacional**. Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2003. p1-20.

PILEGGI, R.G.; STUDART, A.R.; PANDOLFELLI, V.C.; GALLO, J.; ***How Mixing Affects the Rheology of Refractory Castables***. Part 2. American Ceramic Society Bulletin, v. 80, n. 7. 2001. p. 38-42.

PORTELLA, K. F. GARCIA, C. M.; CANTÃO, M. P.; SALES, A.; RIBEIRO, C.; JOUKOSKI, A.; CARON, L. E.; STEFFEN, R. D. BARON, O.; PAULA, J. F. **Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de estruturas de concreto armado**. Relatório final de projeto. Curitiba, LACTEC, 2001. Relatório Técnico.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S., DAFICO, D. de A. **Cinza da casca de arroz**. Coleção Habitare, v. 4. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008. 172p.

QUEBAUD, M., COURTIAL, M., BUYLE-BODIN, F. - ***The Recycling of Demolition Materials: Basic Properties of Concretes with Recycled Aggregates from Demolished Buildings***. Proceedings of R'97 - Recovery, Recycling, Re-Integration, Internacional Congress With Exhibition. v.2, p. 11179-11186. Genova, Switzerland, 1997.

RAEDER FILHO, M. **Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. 161p.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. ***Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete***. Resources, conservation and recycling. 2007. P 71-81.

RATTANASAK, U.; KENDALL, K. ***Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography***. Cement and Concrete Research 35 (2005). p 637-640.

RAVERDY, M; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M; DRON, R. ***Appreciation of pozzolanic reactivity of mirror components***. 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Vol.3, France, Paris, 1980.

RESS, W. E. ***The built environment and the ecosphere: a global perspective. Building Research & Information***. The International Journal of Research, Development, Demonstration & Innovation – Special Issue – Assessing the Environmental Performance of Building: Green Building Challenge 98, v.27, n 4/5 July-October. Pg 206-220, 1999.

RILEM – MR 4. ***Water – retention capacity or mortar***. 1982.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Aproveitamento de resíduos na construção**. Coletânea Habitare. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Capítulo 3. Disponível em: <[http://habitare.infohab.org.br/publicacao\\_coletanea4.aspx](http://habitare.infohab.org.br/publicacao_coletanea4.aspx)> Acesso em 28 de maio de 2011.

ROCHA, G. G. N. VASCONCELOS. W. L. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Concreto e Construções**. n. 42. IBRACON, 2006. P 98-116.

RODRIGUES, M. S. **Caracterização de cinza residual da queima de casca de arroz para a produção de argamassa.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP, 2008. 115p.

RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A. L. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual.** *Eng. Agríc.*, Abr 2010, vol.30, no.2, p.193-204. ISSN 0100-6916.

ROMANO, R. C. O.; MENDES, T. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa.** 17º CBECTMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Paraná. Foz do Iguaçu, 2006.

ROMERO, T. **Bagaço na construção civil.** Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcaocivil>> htm. Acesso 31 de maio de 2011.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. **Efeito do metacaulim no desempenho das propriedades do concreto leve estrutural.** 48º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Rio de Janeiro, 22 à 27 de setembro de 2006.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: Uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais.** Coletânea Habitare. Vol. 4. Utilização de resíduos na construção habitacional. Capítulo 4. Disponível em <[http://habitare.infohab.org.br/publicacao\\_coletanea4.aspx](http://habitare.infohab.org.br/publicacao_coletanea4.aspx)> Acesso em 26 de maio de 2011.

SABBATINI, F. H. **Tecnologia de execução de revestimento de argamassas.** In. 13º Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto. São Paulo, 1990.

SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimentos – aspectos físicos.** In: Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986. p. 69-76.

SCAPIN, V. de O. **Aplicação da Fluorescência de raios X (WDXRF): Determinação da espessura e composição química de filmes finos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 77p.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: Propriedades e ensaios.** Editora PINI Ltda. São Paulo, 1986.

SHANNAG, M. J. YEGINOBALI, A. ***Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan.*** Cement and Concret Research. vol.25. n3. 1995. p 647-657.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SABIR, B.B., WILD, S., BAI, J., 2001. ***Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review.*** Cem. Concr. Compos. 23, 441. 2002.

SANTIN, E. **Tijolo por tijolo, num desenho mágico.** Revista Técnica. Volume 4, n.23. São Paulo, 1996. p.18-24.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 1992.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de castanha de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. UFSC. Florianópolis, 2006.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO F. R. 1946. **Concreto e seus materiais: propriedades e testes.** São Paulo : PINI, 1986.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de Resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011. 91p.

SILVA, M. G; SOUZA, F. L. S. **Proposta de utilização de resíduos da indústria de celulose e papel e entulho de obra em componentes de construção.** In: VI Encontro de Tecnologia no Ambiente Construído, Rio de Janeiro, 1995. Qualidade e tecnologia na habitação; Anais. São Paulo. Rio de Janeiro : ANTAC, 1995.

SILVA, R. M. da C. **Utilização da técnica de fluorescência de raios-X com microsonda ( $\mu$ -XRF) aplicada a amostras de interesse arqueológico.** Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. São Paulo, Piracicaba, 2002. 85p.

SILVA, N. G. da; CAMPITELI, V. C. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento.** Segundo Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, Paraná, 14 a 18 de agosto de 2006.

SILVA, N. G. da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimentos de argamassa na fase plástica.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011. 329p.

SILVA, N. I. W. da, CALAFARGE, L. M., CHIES, F., MALLMANN, J. E., ZWONOK, O. **Caracterização de Cinzas Volantes para Aproveitamento Cerâmico.** Cerâmica. Volume 45, n 296. São Paulo, 1999.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. **A cinza de casca de arroz como adição mineral. Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil.** Universidade de São Paulo. USP. São Paulo, 1996.

SILVEIRA, A. A.; RUARO, P. **A adição de cinza de casca de arroz em concretos: Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto.** Seminário da disciplina de novos materiais. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Porto Alegre, 1995.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>> Acessado em 22 de março de 2010.

SHI, C. ***Na overview on the activation of reactivity of natural pozzolans.*** Canadian Journal of Civil Engineering 28, 778 – 786.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** *Porto Alegre. Tese de doutorado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2003. 203p.

SOUZA, A. A. de; BITTENCOURT, M. A. **A contribuição da Difração dos Raios-X para configuração molecular.** Ensino e Pesquisa. Volume 1; Número 5, 2008. ISSN 1676-1030.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 3v, 1992.

SHVARZMAN A., KOVLER K., GRADER G. S., SHTER G. E. ***The effect of dhydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, Cement and Concrete Research.*** vol. 33, pp.405-416, Elsevier Science Ltd, 2003.

SWAMY, R. N. ***Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali silica reaction***. In: Durability of Concrete, Detroit: Jens Holn & Mete Geiker, 1992, SP 131-12. ACI. Pg 219-254.

TABOGA, S. R. ***Microscopia***. In: RECCO-PIMENTEL, S. M.; CARVALHO, H. F. A célula 2001. cap. 2.. p. 06-14. 2001.

TANNER, R. I. ***Engineering Rheology***. Rev. ed. Oxford Science Publications, New York, 1998.

TAYLOR, H. F. W. ***Cement chemistry***. London: Academic Press, 1990. 475p.

TAYLOR, H. F. W. ***The Chemistry of Cements***, Academic Press, London. 1997.

TORRES, R. M.; BASALDELLA, E. I.; MARCO, J. F. ***The effec of thermal and machanical treatments on kaolinite characterization by XPS and EIP measurements***. Journal of Colloid and Interface Science 215. 1999. 339 – 344.

TURANLI, L.; UZAL, B.; BEKTAS, F. ***Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing higt volumes of natural pozzolan***. Cement and Concrete Research 34 (2004) 2277-2282.

VARGAS, A. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F.; JALALI, S.; GOMES, J. C. ***Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub>***. Revista Matéria, v.12, n.3, 2007. ISSN 1517-7076. P 462-469.

VAZQUEZ, A. M. A. ***Estudo das propriedades reológicas de polipropilenos em fluxos de cisalhamento e fluxos elongacionais***. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007. 122 p.

VIZCAYNO, C.; GUTIÉRREZ, R. M. de; CASTELLO, R.; RODRIGUES, E.; GUERRERO, C. E. ***Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal***

**treatments of kaolin.** Applied Clay Science, 2009. doi:10.1016/j.clay.2009.09.008. 9 p.

VOGT, J. C.; PINHO, V. X. CORRÊA, E. C. S. AGUILAR, M. T. P.; CETLIN; P. R. **Influência da adição de resíduos minerais na resistência mecânica, tenacidade à fratura e módulo de Young do concreto.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Paraná. Foz do Iguaçu, 2006.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, New York, v. 26, n. 10, p. 1537- 1544, Out. 1996.

YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y., COIMBRA, A. M., MONTANHEIRO, T. J. **Enviromental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil.** Environmental Geosciences, 4. pg 192-206. 1997.

ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, K. S.; KIM, J. C. **Concreto incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive estrength and resistance to chloride-ion penetration.** ACI Materials Journal, v. 96, n.2, March-April 1999. p 181 – 189.

ZHOU, W.; WANG, Z. L. **Fundamentals of Scanning Electron Microscopy.** In: Scanning Microscopy for Nanotechnology, New York: Springer Science+Business Media, LLC 2006, 1–40



## **ANEXO**

### **ANÁLISE ESTATÍSTICA**

## CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

O agregado miúdo natural foi classificado como uma areia média conforme estabelecido pela norma NBR 7211/05. Adotou-se a hipótese de variâncias equivalentes para as duas amostras da areia analisada. Para tal, aplicou-se a análise estatística Teste-t e os seus resultados encontram-se descritos na Tabela A1.

Tabela A1 – Análise estatística das areias pelo método Teste-t

	<i><b>Areia 2</b></i>	<i><b>Areia 1</b></i>
Média	65,28333	65,05
Variância	2195,478	2246,171
Observações	6	6
Variância agrupada	2220,824	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	10	
Stat t	0,008576	
P(T<=t) uni-caudal	0,496663	
t crítico uni-caudal	1,812461	
P(T<=t) bi-caudal	0,993326	
t crítico bi-caudal	2,228139	

Notou-se pela Tabela A1 que não existiram diferenças estatisticamente significativas uma vez que  $P(T \leq t)$  bi-caudal = 0,993326, correspondente ao valor-p, é maior que 0,05 (5%). Concluiu-se, desta forma, que os resultados das análises granulométricas para as duas amostras da areia foram iguais estatisticamente ao grau de significância de 95%.

### Determinação do resíduo na peneira 45 $\mu\text{m}$

Analisando os resultados da quantidade de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  pelo método estatístico ANOVA, notou-se que o valor-p =  $6,37 \cdot 10^{-10}$  é menor que o grau de significância de 0,05, bem como  $F > F_{\text{crítico}}$ , o que demonstra que os resultados apresentaram diferenças significativas estatisticamente, como mostrado na Tabela A2.

Tabela A2 - Análise da Variância (ANOVA) para o material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ 

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	959,8022	2	479,9011	3483,153	6,37E-10	5,143253
Dentro dos grupos	0,826667	6	0,137778			
Total	960,6289	8	960,6289			

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

### Massa específica das pozolanas

Com base nos dados obtidos realizou-se uma análise de variância com intuito de verificar se os valores de massa específica para os diferentes materiais foram em média diferentes, e seus dados foram listados na Tabela A3.

Tabela A3 – Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das cinzas

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,192956	2	0,096478	361,7917	5,56E-07	5,143253
Dentro dos grupos	0,0016	6	0,000267			
Total	0,194556	8				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Com um grau de confiança de 95% concluiu-se que existiram diferenças estatisticamente significativas de massa específica entre os diferentes materiais, uma vez que o valor  $-p = 5,56^{-7}$  foi menor que o grau de significância de 0,05. Observando os valores de F e Fcrítico, notou-se que  $F \gg F_{\text{crítico}}$ , aceitando desta forma a hipótese de diferença e concluindo assim que existem diferenças, na média, entre os grupos.

## CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

### Massa específica no estado fresco

Os resultados dos testes de massa específica das argamassas no estado fresco encontram-se apresentados na Tabela A4.

Tabela A4 – Massa específica das argamassas

<b>Argamassa</b>	<b>Número de repetições</b>	<b>Soma (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Variância</b>
Referência	3	6,12	2,04	1,59E-05
5% CB	3	6,15	2,05	1,809E-05
7,5% CB	3	6,14	2,04	2,466E-05
10% CB	3	6,15	2,05	5,543E-06
5% CV	3	6,13	2,04	7,061E-06
7,5% CV	3	6,12	2,04	6,816E-06
10% CV	3	6,11	2,03	1,886E-05
5% Si	3	6,11	2,03	2,536E-06
7,5% Si	3	6,15	2,05	4,516E-06
10% Si	3	6,16	2,05	1,543E-05

Analisando os resultados pelo método estatístico ANOVA, concluiu-se que, com um grau de confiança de 95% que existiram diferenças estatisticamente significativas entre as argamassas, uma vez que o valor-P=  $3,9^{-5}$  foi menor que o grau de significância de 0,05. Os valores de F e Fcrítico mostraram que  $F > F_{\text{crítico}}$ , aceitando desta forma a hipótese da diferença entre os resultados, concluindo-se, assim, que houve diferenças, na média, entre os grupos, como observado na Tabela A5.

Tabela A5 - Análise da Variância (ANOVA) para a massa específica das argamassas

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	0,000912109	9	0,000101	8,4871278	3,9E-05	2,392814
Dentro dos grupos	0,000238822	20	1,19E-05			
Total	0,001150931	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Embora haja diferenças estatisticamente significativas de massa específica entre as argamassas, as mesmas foram classificadas segundo a norma

NBR 13278/05 como D5, ou seja, com uma massa específica compreendida entre 1.800 kg/m<sup>3</sup> à 2.200 kg/m<sup>3</sup>.

#### Determinação do teor de ar incorporado

As quantidades de ar incorporado entre as argamassas analisadas foram diferentes estatisticamente, fator comprovado pela análise estatística pelo método ANOVA, Tabela A6, para um grau de significância de 95% de confiança, o que confirma a hipótese do tipo de material, bem como a sua granulometria influenciarem nas características finais das argamassas. Concluiu-se para o teste em questão que existiram diferenças significativas estatisticamente entre os resultados apresentados, haja vista que o valor  $P = 3,23e^{-07}$  foi menor que o grau de significância de 0,05, bem como os valores de F foram maiores que os do Fcrítico.

Tabela A6 - Análise da Variância (ANOVA) para o teor de ar incorporado

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	1,280297	9	0,142255	15,62099	3,23E-07	2,392814
<b>Dentro dos grupos</b>	0,182133	20	0,009107			
<b>Total</b>	1,46243	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

#### Determinação da retenção de água

Pela análise dos resultados pelo método estatístico (ANOVA) para um grau de significância de 95%, como mostrado na Tabela A7, concluiu-se para o teste de retenção de água que existiram diferenças significativas estatisticamente entre os resultados apresentados para as argamassas com diferentes porcentagens de adição de material pozolânico, uma vez que o valor  $P = 0,001138$  foi menor que o grau de significância de 0,05. Os valores de F foram maiores do que Fcrítico, aceitando-se desta forma a hipótese de diferença entre os resultados, na média, entre as argamassas.

Tabela A7 - Análise da Variância (ANOVA) para a retenção de água das argamassas

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	488,4673	9	54,27415	138,9907	4,84E-16	2,392814
<b>Dentro dos grupos</b>	7,809754	20	0,390488			
<b>Total</b>	496,2771	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

## CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

### Resistência à tração na flexão

A análise estatística da resistência mecânica à tração das argamassas pelo método ANOVA mostrou que, com um grau de confiança de 95%, existiram diferenças estatisticamente significativas entre as resistências mecânicas à tração para as diferentes porcentagens de adição de material pozolânico, uma vez que o valor  $P = 0,001138$  foi menor que o grau de significância de 0,05.

Pela análise dos valores de F e Fcrítico, notou-se que  $F > F_{\text{crítico}}$ , aceitando desta forma a hipótese de diferença entre os resultados, concluindo-se, assim, pelas diferenças, na média, entre as argamassas, como observado na Tabela A8.

Tabela A8 - Análise da Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à tração das argamassas

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	5,500401	9	0,611156	5,128978	0,001138	2,392814
<b>Dentro dos grupos</b>	2,383148	20	0,119157			
<b>Total</b>	7,883549	29				

Notas: SQ – soma quadrada; gl – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

## APÊNDICE

# Granulometria

Tabela A9 – Análise granulométrica da areia

Abertura das Peneiras		Areia 1			Areia 2		
(Polegadas)	(mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem Acumulada	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem Acumulada
3,0"	75	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
2,5"	64	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2"	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 1/2	38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 1/4	32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4	19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/8	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/4	6,3	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
nº 4	4,8	0,6	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1
nº 8	2,4	28	7,5	7,7	26,6	7,2	7,3
nº 16	1,2	76,5	20,6	28,3	74,5	20,2	27,5
nº 30	0,6	76,3	20,5	48,8	75,7	20,5	48,0
nº 50	0,3	88,7	23,9	72,6	89,6	24,3	72,3
nº 100	0,15	101,8	27,4	100,0	102,3	27,7	100,0
Fundo	0,10	127,6	34,3	134,3	129,9	35,2	135,2
Total		371,9			369,2		
Módulo de finura médio					2,56		
Dimensão Máxima característica da areia					4,8 (mm)		



## Retenção de água

Tabela A10 – Teste de retenção de água das argamassas no estado fresco

Argamassa	Massa inicial - Argamassa + Pote (g)	Massa Final - Argamassa + Pote (g)	Conjunto Vazio (g)	Massa de Água (g)	Soma dos materiais secos (g)	AF	ma - ms	ma - mv	Retenção de água (%)
Referência	1827,36		520,92	500,00	3700	0,11904762	1827,36	1306,44	-1074,94
5% CB	1879,19	1857,23	520,92	500,00	3745	0,11778563	21,96	1358,27	86,27
7,5% CB	1858,61	1840,98	520,92	500,00	3765	0,11723329	17,63	1337,69	88,76
10% CB	1920,98	1902,00	520,92	500,00	3786	0,11665889	18,98	1400,06	88,38
5% CV	1841,06	1814,50	520,92	500,00	3745	0,11778563	26,56	1320,14	82,92
7,5% CV	1853,14	1831,98	520,92	500,00	3766	0,11720581	21,16	1332,22	86,45
10%CV	1860,59	1846,18	520,92	500,00	3787	0,11663168	14,41	1339,67	90,78
5% Si	1847,55	1830,74	520,92	500,00	3745	0,11778563	16,81	1326,63	89,24
7,5% Si	1852,28	1833,73	520,92	500,00	3765	0,11723329	18,55	1331,36	88,12
10% Si	1863,91	1851,29	520,92	500,00	3785	0,11668611	12,62	1342,99	91,95

## Resistência à compressão

Tabela A11 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) - 28 dias						Força (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)
	CP1A	CP1B	CP2A	CP2B	CP3A	CP3B			
<b>Referência</b>	4800	49684	49537	49929	46527	47122	41266,50	1600	25,79
<b>5% CB</b>	51348	50757	53797	54987	52145	52277	52551,83	1600	32,84
<b>7,5% CB</b>	57168	60472	53731	57102	55842	58225	57090,00	1600	35,68
<b>10% CB</b>	59481	58490	56044	58886	54524	53863	56881,33	1600	35,55
<b>5% CV</b>	56194	54563	55803	54498	53257	54759	54845,67	1600	34,28
<b>7,5% CV</b>	54693	56717	55411	55346	53845	55020	55172,00	1600	34,48
<b>10% CV</b>	52013	61001	60538	51088	53202	52409	55041,83	1600	34,40
<b>5% Si</b>	62984	50691	49766	58225	57102	50361	54854,83	1600	34,28
<b>7,5% Si</b>	70161	72968	70357	70031	70179	66376	70012,00	1600	43,76
<b>10% Si</b>	81357	86578	72501	76664	70915	55185	73866,67	1600	46,17

Tabela A12 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 56 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) - 56 dias						Força (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)
	CP1A	CP1B	CP2A	CP2B	CP3A	CP3B			
<b>Referência</b>	47783	44280	46197	43752	46924	49435	46395,17	1600	29,00
<b>5% CB</b>	46792	61794	55648	51947	57168	56903	55042,00	1600	34,40
<b>7,5% CB</b>	48907	58952	47122	58225	65297	62785	56881,33	1600	35,55
<b>10% CB</b>	60588	57036	60666	55978	55583	56573	57737,33	1600	36,09
<b>5% CV</b>	53136	56573	54062	57961	53731	60869	56055,33	1600	35,03
<b>7,5% CV</b>	54194	53996	59018	61728	67412	69130	60913,00	1600	38,07
<b>10% CV</b>	56837	58357	56701	55119	56044	56767	56637,50	1600	35,40
<b>5% Si</b>	66883	63380	64504	63446	71447	68953	66435,50	1600	41,52
<b>7,5% Si</b>	60671	58225	75144	76730	78978	80564	71718,67	1600	44,82
<b>10% Si</b>	76427	77014	76558	75579	72250	70031	74643,17	1600	46,65

Tabela A13 – Teste de resistência mecânica à compressão das argamassas aos 91 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) - 91 dias						Força (N)	Área (mm²)	Resistência (MPa)
	CP1A	CP1B	CP2A	CP2B	CP3A	CP3B			
<b>Referência</b>	41498	45679	51220	50757	56507	54656	50052,83	1600	31,28
<b>5% CB</b>	64636	68139	64173	63711	62653	63777	64514,83	1600	40,32
<b>7,5% CB</b>	65099	64342	64834	64966	63314	67676	65038,50	1600	40,65
<b>10% CB</b>	61860	65627	64636	61001	66288	64589	64000,17	1600	40,00
<b>5% CV</b>	66090	63645	54987	57168	57763	57895	59591,33	1600	37,24
<b>7,5% CV</b>	65429	55648	55912	64107	68668	63909	62278,83	1600	38,92
<b>10% CV</b>	65627	55119	67874	66061	64227	56280	62531,33	1600	39,08
<b>5% Si</b>	68734	70386	70584	73029	70584	65693	69835,00	1600	43,65
<b>7,5% Si</b>	77259	78052	77127	86115	75409	79110	78845,33	1600	49,28
<b>10% Si</b>	69857	62785	79969	86049	90279	78779	77953,00	1600	48,72

## Resistência à tração

Tabela A14 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 28 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) 28 dias			Força média (N)	Resistência (MPa)			Resistência média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		CP1	CP2	CP3		
<b>Referência</b>	2850	2747	2549	2715,33	6,68	6,44	5,97	6,36	0,3585
<b>5% CB</b>	2821	2892	2861	2858,00	6,61	6,78	6,71	6,70	0,0834
<b>7,5% CB</b>	2937	2943	2906	2928,67	6,88	6,90	6,81	6,86	0,0465
<b>10% CB</b>	2948	2967	2917	2944,00	6,91	6,95	6,84	6,90	0,0592
<b>5% CV</b>	2885	2800	2611	2765,33	6,76	6,56	6,12	6,48	0,3287
<b>7,5% CV</b>	2905	2327	2813	2681,67	6,81	5,45	6,59	6,29	0,7279
<b>10% CV</b>	2913	2871	2823	2869,00	6,83	6,73	6,62	6,72	0,1055
<b>5% Si</b>	2937	2892	2904	2911,00	6,88	6,78	6,81	6,82	0,0546
<b>7,5% Si</b>	2912	3191	3064	3055,67	6,83	7,48	7,18	7,16	0,3274
<b>10% Si</b>	3406	3139	3389	3311,33	7,98	7,36	7,94	7,76	0,3504

Tabela A15 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 56 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) 56 dias			Força média (N)	Resistência (MPa)			Resistência média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		CP1	CP2	CP3		
<b>Referência</b>	2698	2770	2770	2746,00	6,32	6,49	6,49	6,44	0,0974
<b>5% CB</b>	2885	2963	2811	2886,33	6,76	6,94	6,59	6,76	0,1781
<b>7,5% CB</b>	2875	2843	2914	2877,33	6,74	6,66	6,83	6,74	0,0833
<b>10% CB</b>	2604	3003	3200	2935,67	6,10	7,04	7,50	6,88	0,7117
<b>5% CV</b>	2817	2949	2867	2877,67	6,60	6,91	6,72	6,74	0,1562
<b>7,5% CV</b>	2895	3194	2773	2954,00	6,79	7,49	6,50	6,92	0,5077
<b>10% CV</b>	3111	2822	2952	2961,67	7,29	6,61	6,92	6,94	0,3392
<b>5% Si</b>	3205	3158	3097	3153,33	7,51	7,40	7,26	7,39	0,1269
<b>7,5% Si</b>	3209	3278	3186	3224,33	7,52	7,68	7,47	7,56	0,1122
<b>10% Si</b>	3348	3147	3087	3194,00	7,85	7,38	7,24	7,49	0,3204

Tabela A16 – Teste de resistência mecânica à tração das argamassas aos 91 dias

Amostra	Carga de ruptura (N) 91 dias			Força média (N)	Resistência (MPa)			Resistência média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		CP1	CP2	CP3		
<b>Referência</b>	2611	2665	2726	2667,33	6,12	6,25	6,39	6,25	0,1348
<b>5% CB</b>	2900	2979	3150	3009,67	6,80	6,98	7,38	7,05	0,2995
<b>7,5% CB</b>	3069	3109	2998	3058,67	7,19	7,29	7,03	7,17	0,1318
<b>10% CB</b>	3091	3106	3124	3107,00	7,24	7,28	7,32	7,28	0,0387
<b>5% CV</b>	2564	2914	2806	2761,33	6,01	6,83	6,58	6,47	0,4201
<b>7,5% CV</b>	2914	3311	3123	3116,00	6,83	7,76	7,32	7,30	0,4655
<b>10% CV</b>	3177	3057	3505	3246,33	7,45	7,16	8,21	7,61	0,5435
<b>5% Si</b>	3040	3287	3456	3261,00	7,13	7,70	8,10	7,64	0,4903
<b>7,5% Si</b>	3505	3560	2952	3339,00	8,21	8,34	6,92	7,83	0,7882
<b>10% Si</b>	3811	3602	3431	3614,67	8,93	8,44	8,04	8,47	0,4461

## Massa específica no estado endurecido

Tabela A17 – Valores de densidade de massa no estado endurecido

Corpo de prova	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)	Massa (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	16,1	4,0	4,1	481,5	264,04	1,824	1,854
	16,1	4,0	4,0	481,4	257,60	1,869	
	16,1	4,0	4,1	493,3	264,04	1,868	
5% CB	16,1	4,0	4,0	493,6	257,60	1,916	1,905
	16,1	4,0	4,0	485,5	257,60	1,885	
	16,1	4,0	4,0	492,7	257,60	1,913	
7,5% CB	16,0	4,0	4,0	489,2	256,00	1,911	1,897
	16,0	4,0	4,0	485,6	256,00	1,897	
	16,0	4,0	4,0	482,3	256,00	1,884	
10% CB	16,0	4,0	4,0	492,2	256,00	1,923	1,934
	16,0	4,0	4,0	491,8	256,00	1,921	
	16,0	4,0	4,0	501,4	256,00	1,959	
5% CV	16,0	4,0	4,0	483,3	256,00	1,888	1,888
	16,0	4,0	4,0	480,3	256,00	1,876	
	16,0	4,0	4,0	486,1	256,00	1,899	
7,5% CV	16,1	4,0	4,0	486,9	257,60	1,890	1,895
	16,1	4,0	4,1	497,5	264,04	1,884	
	16,0	4,0	4,0	488,8	256,00	1,909	
10% CV	16,0	4,0	4,0	484,0	256,00	1,891	1,892
	16,0	4,0	4,0	487,5	256,00	1,904	
	16,0	4,0	4,0	481,8	256,00	1,882	
5% Si	16,0	4,0	4,0	489,7	256,00	1,913	1,908
	16,0	4,0	4,0	491,4	256,00	1,920	
	16,0	4,0	4,0	483,9	256,00	1,890	
7,5% Si	16,0	4,0	4,1	496,4	262,40	1,892	1,865
	16,1	4,0	4,1	483,9	264,04	1,833	
	16,0	4,0	4,1	490,5	262,40	1,869	
10% Si	16,0	4,1	4,0	490,2	262,40	1,868	1,929
	16,2	4,0	4,0	507,5	259,20	1,958	
	16,0	4,0	4,0	502,3	256,00	1,962	

Tabela A18 - Resistência de aderência da argamassa de referência

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,286	S	0,135	S	0,256	S
CP 2	0,235	S	0,149	S	0,370	S
CP 3	0,080	S	0,34	S	0,229	S
CP 4	0,198	S	0,112	S	0,258	S
CP 5	0,206	S	0,203	S	0,314	S
CP 6	0,106	S	0,435	S	0,421	S
CP 7	0,186	S	0,275	S	0,381	S
CP 8	0,219	S	0,187	S	0,286	S
CP 9	0,153	S	0,276	S	0,253	S
CP 10	0,168	S	0,301	S	0,327	S

Tabela A19 - Resistência de aderência da argamassa com 5% CB

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,199	S	0,295	S	0,388	S
CP 2	0,116	S	0,198	S	0,300	S
CP 3	0,088	S	0,277	S	0,222	S
CP 4	0,409	S	0,356	S	0,215	S
CP 5	0,273	S	0,289	S	0,341	S
CP 6	0,166	S	0,495	S	0,494	S
CP 7	0,247	S	0,308	S	0,329	S
CP 8	0,192	S	0,287	S	0,472	S
CP 9	0,219	S	0,293	S	0,258	S
CP 10	0,185	S	0,241	S	0,321	S

Tabela A20 - Resistência de aderência da argamassa com 7,5% CB

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,236	S	0,236	S	0,256	S
CP 2	0,297	S	0,56	S	0,329	S
CP 3	0,153	S	0,326	S	0,282	S
CP 4	0,102	S	0,457	S	0,368	S
CP 5	0,142	S	0,261	S	0,384	S
CP 6	0,264	S	0,188	S	0,188	S
CP 7	0,239	S	0,365	S	0,234	S
CP 8	0,193	S	0,274	S	0,289	S
CP 9	0,189	S	0,341	S	0,38	S
CP 10	0,201	S	0,209	S	0,217	S

Tabela A21 - Resistência de aderência da argamassa com 10% CB

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,127	S	0,258	S	0,229	S
CP 2	0,171	S	0,141	S	0,208	S
CP 3	0,149	S	0,173	S	0,355	S
CP 4	0,167	S	0,36	S	0,223	S
CP 5	0,223	S	0,172	S	0,306	S
CP 6	0,187	S	0,241	S	0,317	S
CP 7	0,193	S	0,205	S	0,209	S
CP 8	0,156	S	0,192	S	0,320	S
CP 9	0,209	S	0,207	S	0,271	S
CP 10	0,143	S	0,285	S	0,285	S



Tabela A22 - Resistência de aderência da argamassa com 5% CV

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,292	S	0,321	S	0,223	S
CP 2	0,158	S	0,366	S	0,408	S
CP 3	0,300	S	0,238	S	0,241	S
CP 4	0,196	S	0,312	S	0,272	S
CP 5	0,175	S	0,394	S	0,221	S
CP 6	0,191	S	0,257	S	0,599	S
CP 7	0,169	S	0,282	S	0,328	S
CP 8	0,201	S	0,319	S	0,289	S
CP 9	0,136	S	0,382	S	0,439	S
CP 10	0,257	S	0,254	S	0,309	S

Tabela A23 - Resistência de aderência da argamassa com 7,5% CV

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,108	S	0,424	S	0,155	S
CP 2	0,135	S	0,184	S	0,105	S
CP 3	0,095	S	0,165	S	0,227	S
CP 4	0,119	S	0,096	S	0,213	S
CP 5	0,136	S	0,239	S	0,240	S
CP 6	0,275	S	0,23	S	0,730	S
CP 7	0,201	S	0,179	S	0,317	S
CP 8	0,194	S	0,193	S	0,285	S
CP 9	0,182	S	0,205	S	0,328	S
CP 10	0,152	S	0,229	S	0,209	S

Tabela A24 - Resistência de aderência da argamassa com 10% CV

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,125	S	0,317	S	0,761	S
CP 2	0,080	S	0,385	S	0,224	S
CP 3	0,132	S	0,401	S	0,227	S
CP 4	0,091	S	0,367	S	0,483	S
CP 5	0,187	S	0,146	S	0,337	S
CP 6	0,184	S	0,205	S	0,219	S
CP 7	0,149	S	0,247	S	0,237	S
CP 8	0,193	S	0,297	S	0,391	S
CP 9	0,232	S	0,259	S	0,268	S
CP 10	0,117	S	0,302	S	0,273	S

Tabela A25 - Resistência de aderência da argamassa com 5% Si

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,214	S	0,239	S	0,288	S
CP 2	0,201	S	0,211	S	0,264	S
CP 3	0,182	S	0,373	S	0,286	S
CP 4	0,179	S	0,23	S	0,315	S
CP 5	0,271	S	0,351	S	0,273	S
CP 6	0,281	S	0,173	S	0,326	S
CP 7	0,247	S	0,246	S	0,379	S
CP 8	0,198	S	0,251	S	0,281	S
CP 9	0,236	S	0,302	S	0,309	S
CP 10	0,223	S	0,318	S	0,259	S

Tabela A26 - Resistência de aderência da argamassa com 7,5% Si

Argamassa	Idade					
	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,146	S	0,123	S	0,486	S
CP 2	0,230	S	0,137	S	0,177	S
CP 3	0,143	S	0,145	S	0,210	S
CP 4	0,216	S	0,149	S	0,222	S
CP 5	0,309	S	0,157	S	0,461	S
CP 6	0,168	S	0,244	S	0,389	S
CP 7	0,198	S	0,173	S	0,394	S
CP 8	0,207	S	0,168	S	0,283	S
CP 9	0,235	S	0,205	S	0,260	S
CP 10	0,261	S	0,161	S	0,193	S

Tabela A27 - Resistência de aderência da argamassa com 10% Si

Argamassa	28 dias		56 dias		91 dias	
	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura	Tensão (MPa)	Local de ruptura
CP 1	0,125	S	0,200	S	0,199	S
CP 2	0,069	S	0,229	S	0,337	S
CP 3	0,285	S	0,196	S	0,224	S
CP 4	0,087	S	0,276	S	0,210	S
CP 5	0,201	S	0,310	S	0,213	S
CP 6	0,160	S	0,191	S	0,185	S
CP 7	0,231	S	0,245	S	0,203	S
CP 8	0,189	S	0,271	S	0,305	S
CP 9	0,158	S	0,283	S	0,217	S
CP 10	0,172	S	0,247	S	0,289	S

## Tabela de números aleatórios

57 72 00 39 84	84 41 79 67 71	40 21 13 97 56	49 86 54 08 93	29 68 74 54 83
28 80 53 51 59	09 93 98 87 58	70 27 71 77 17	06 32 02 78 62	16 74 69 65 17
92 59 18 52 87	30 48 86 97 48	35 25 18 88 74	03 62 98 38 58	65 86 42 41 03
90 38 12 91 74	30 19 75 89 07	50 64 15 59 71	88 13 74 95 30	52 78 30 11 75
80 91 16 94 67	58 60 82 06 66	90 47 56 18 46	45 11 12 35 32	45 50 41 13 43
22 01 70 31 32	96 91 92 75 40	16 54 29 72 74	99 00 95 97 61	00 98 24 30 07
56 24 10 04 30	20 46 29 90 53	53 11 05 84 41	21 64 79 19 76	29 51 62 60 66
79 44 92 62 02	96 86 64 30 00	94 56 69 30 20	59 87 87 35 44	22 50 97 78 19
53 99 66 45 08	89 78 50 77 53	37 25 77 41 27	62 38 02 23 57	62 01 41 60 35
18 92 87 35 88	56 05 21 36 51	39 28 50 14 66	85 79 30 19 79	72 66 64 31 45
53 08 58 96 63	05 61 25 70 22	50 41 28 96 62	66 43 63 06 63	01 32 79 85 22
03 58 80 29 28	76 89 51 18 24	88 89 46 47 48	59 19 29 87 03	10 33 99 67 12
27 07 81 88 65	69 49 98 00 28	04 70 51 30 01	47 18 97 33 21	85 82 45 43 24
05 21 08 59 01	06 22 24 98 91	81 17 55 44 66	16 07 73 07 66	10 12 31 78 58
40 36 13 27 84	30 82 33 36 39	69 42 05 58 64	61 12 33 89 27	89 52 66 71 93
54 60 25 28 85	88 20 00 10 59	61 05 36 61 33	72 01 01 19 01	61 10 51 20 91
71 51 63 40 76	71 11 73 73 52	37 31 60 45 88	92 73 43 71 28	04 98 09 02 48
61 02 01 81 73	92 60 66 73 58	53 34 42 68 26	38 34 03 27 44	96 04 46 65 93
82 55 93 13 46	30 95 26 55 06	96 17 65 91 72	39 79 96 12 49	52 80 63 26 99
89 98 54 14 21	74 13 57 68 19	86 28 60 89 47	33 15 26 28 77	45 38 48 08 08
00 99 84 84 14	67 95 13 77 58	90 14 50 79 42	73 63 31 06 60	43 40 12 55 04
62 41 50 78 20	48 05 88 43 52	98 03 19 93 92	03 04 97 25 84	95 95 03 63 31
94 27 90 69 24	68 09 92 11 86	07 63 83 19 32	99 51 15 55 71	09 27 02 67 00
44 89 29 28 84	36 28 25 15 82	87 74 18 97 25	76 10 63 26 76	02 26 74 53 28
97 30 76 95 33	21 10 54 26 95	66 65 52 04 99	36 58 48 03 08	93 63 58 17 96
39 16 58 04 44	80 15 59 59 83	90 95 54 66 81	84 39 60 85 38	88 66 33 35 69
60 78 11 03 26	67 50 34 09 61	31 30 20 76 93	66 30 83 51 09	33 83 64 76 05
03 19 23 47 62	89 57 77 91 33	88 47 60 59 37	54 39 48 77 67	49 85 38 43 91
41 28 52 67 56	25 39 59 96 65	51 36 90 32 22	39 33 05 22 99	03 39 97 96 99
77 54 98 50 39	25 37 42 52 97	10 03 56 04 92	81 66 86 70 01	48 89 55 82 10
28 63 41 61 91	64 24 83 81 37	34 48 83 27 96	38 71 69 73 06	77 50 25 64 60
74 24 48 85 40	12 33 59 67 50	14 98 14 26 42	79 79 13 52 89	69 78 80 44 71
00 24 03 37 96	46 68 75 05 32	42 16 63 33 28	97 26 36 47 27	73 65 38 34 46
05 41 47 69 69	45 36 16 71 18	95 51 97 22 04	13 23 96 58 60	03 69 48 79 83
62 69 84 97 97	47 23 66 51 56	13 08 69 11 52	75 59 26 86 81	80 43 00 98 92